Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Edificación

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTÁTICO Y DINÁMICO DE ELEMENTOS DE MADERA DE PINO SILVESTRE EMPLEADOS EN MEDIOS AUXILIARES Y PROTECCIONES COLECTIVAS EN EDIFICACIÓN

TESIS DOCTORAL

Nuria Llauradó Pérez

Máster en Técnicas y Sistemas de Edificación
por la Universidad Politécnica de Madrid

2017

Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Edificación

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTÁTICO Y DINÁMICO
DE ELEMENTOS DE MADERA DE PINO SILVESTRE
EMPLEADOS EN MEDIOS AUXILIARES Y PROTECCIONES
COLECTIVAS EN EDIFICACIÓN**

TESIS DOCTORAL

por

Nuria Llauradó Pérez

Máster en Técnicas y Sistemas de Edificación
por la Universidad Politécnica de Madrid

Directores de Tesis:

Alfonso Cobo Escamilla

Dr. Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid

María de las Nieves González García

Dra. por la Universidad Politécnica de Madrid

Madrid, 2017

Tesis Doctoral

“Estudio del comportamiento estático y dinámico de elementos de madera de pino silvestre empleados en medios auxiliares y protecciones colectivas de edificación”

Tribunal nombrado por el Mgfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 2017.

Presidente D.

Vocal D.

Vocal D.

Vocal D.

Secretario D.

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....
de.....de 2017 en la ETS de Edificación de la UPM.

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A Ángel

AGRADECIMIENTOS

Quiero dejar constancia de mi agradecimiento a mis directores de tesis Alfonso Cobo Escamilla y María de las Nieves González García por la confianza que han depositado en mí, por la excelente dirección que han llevado a cabo a lo largo del desarrollo de este trabajo, por la enorme paciencia y por el gran apoyo profesional y especialmente por el apoyo personal que me han brindado en todo momento. Sin su aliento este trabajo no habría visto la luz.

Al profesor Joaquín Santiago por su implicación en la traducción a la lengua inglesa del Abstract robando tiempo a los suyos incluso en días de fiesta, por su cariño, su interés y dedicación para que todos los documentos se presenten en tiempo y forma.

A Santiago Villa, colaborador incansable y entusiasta en todos los trabajos de investigación que se llevan a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la EUATM.

A mis hijos Ángel y Marcos y a Tamara, por su comprensión, excelente disposición, apoyo moral y colaboración en varias partes imposibles del documento.

A mi madre por ser como es, ejemplo de vida.

A Ángel, por dejarme sentir que sigues a mi lado, siempre. Gracias.

RESUMEN

El empleo de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría es habitual en el sector de la Construcción en la zona central de la Península Ibérica.

Existen numerosos estudios sobre este tipo de material pero la mayoría se han realizado sobre piezas de gran escuadría. En elementos de pequeña escuadría como los que normalmente se utilizan en protecciones colectivas (PC) y medios auxiliares de edificación (MAE), existe un vacío de informes técnicos acerca de su comportamiento estructural.

La norma UNE-EN 13374 (AENOR, 2013) “Sistemas provisionales de protección de borde. Especificaciones del producto, métodos de ensayo” especifica que la madera empleada en sistemas provisionales de protección de borde debe poseer como mínimo la clase resistente C16. La obtención de la clase resistente de la madera empleada en construcción para PC y MAE mediante el empleo de la norma UNE 56544 (AENOR, 2011b) “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Maderas de coníferas” dejaría fuera de uso a la mayoría de elementos empleados en la práctica, que suelen ser de madera de cuarta, a la que no se le puede asignar una clase resistente y además la norma supone que su resistencia es inferior a la de la clase C18 en elementos de pino silvestre.

En este trabajo se ha realizado una caracterización mecánica y física de tablas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría de dimensiones aproximadas 2400 x 150 mm y espesores variables comprendidos entre 18 y 40 mm. Se completa el estudio con la caracterización de piezas de gran escuadría de dimensiones 153 x 153 mm de sección y 300 mm de altura, también de pino silvestre y piezas de madera de pino insigne de pequeña escuadría de 150 x 160 mm y 26 mm de espesor.

Las tablas estudiadas corresponden a las calidades comerciales disponibles: especial, primera, segunda, tercera y cuarta.

En todos los elementos se ha realizado una previa clasificación visual y resistente según la norma UNE 56544 (AENOR, 2011b) y posteriormente se han efectuado ensayos a flexión longitudinal, compresión transversal perpendicular y paralela a las fibras, según los casos, para determinar sus características mecánicas reales.

Los resultados obtenidos en la caracterización experimental se han comparado con los valores estimados por la norma y se han buscado correlaciones significativas a efectos de construir modelos de predicción entre las variables estudiadas.

Se han comparado los resultados de las piezas de pequeña con los de gran escuadría. Además, sobre los elementos trabajando a flexión, se ha realizado un estudio del comportamiento a impacto de las piezas.

Finalmente se ha estudiado el módulo de elasticidad dinámico de todas las piezas ensayadas a compresión, obteniendo las ecuaciones de regresión entre este valor y el obtenido experimentalmente a partir de los ensayos mecánicos.

ABSTRACT

The use of small scantling *Pinus sylvestris* wood pieces is a common practice in construction works in the central area of the Iberian Peninsula.

Various studies have analyzed this material, but the focus has been on large scantling pieces. A clear gap in terms of technical reports dealing with the structural behavior of small pieces has been observed, particularly for those commonly used in collective protection and building auxiliary systems.

EN 13374 Standard (AENOR, 2013), 'Provisional Edge Protection Systems. Product Specifications, Testing Methods', establishes that wood used in this protection conditions must be at least type C-16. Obtaining the certification as 'Resistant Type' for timber used in collective protection and building auxiliary systems as referred in UNE 56544 Standard (AENOR, 2011b) 'Visual Classification of Sawn wood for Structural Use. Coniferous Timber' would leave out most elements used in construction works. These elements are rated as fourth quality type and are often classified below the C 18 resistance threshold as wild pine elements.

This work describes the mechanical and physical properties of small scantling wild pine boards between 2400 x 150 mm and thickness in the range of 18-40 mm. The study is completed with the characterization of large size pieces 153 x 153 mm in section and 300 mm in height, also for wild pine, and for small size *insignis* pine pieces between 150 x 160 mm, and 26 mm thick.

The data analyzed correspond to standard types available, namely, those rated: special, first, second, third and fourth quality.

A preliminary visual classification was carried out for all elements as indicated in UNE 56544 (AENOR, 2011b). Next, tests were conducted in order to analyze longitudinal flexion, transversal, perpendicular and parallel compression behavior in the wood fibers, and thus determine their actual mechanical properties.

Results obtained in this experimental analysis have been contrasted with values included the Standard. Additionally, significant co-relations have been

established in order to devise prediction models between the different variables under analysis.

Results obtained from small size and large size pieces have also been compared. Further, an analysis of the behavior-resistance to impact of the pieces under flexion has been conducted.

Finally, the dynamic modulus of elasticity of all pieces tested under compression has been analyzed. This study has yielded regression equations between this value and that obtained from the mechanical tests.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	IX
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XIII
ÍNDICE.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIX
ÍNDICE DE FIGURAS	XXIII
1 ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Morfología y propiedades de la madera	4
1.2.1 Anatomía de la madera	4
1.2.2 Propiedades de la madera.....	8
1.2.3 Relación entre resistencia/rigidez y características de la madera que pueden ser medidas de forma no destructiva ...	23
1.2.4 Descripción y características de la especie Pino Silvestre....	36
1.3 Normativa.....	39
1.3.1 Asignación de clases de calidad a clases resistentes	39
1.3.2 Estado actual y revisión de la técnica de clasificación no destructiva de la madera	43
1.3.3 Clasificación mediante métodos visuales	44
1.3.4 Norma marco EN 14081-1, referencia de las normas visuales	46
1.3.5 Medición de las singularidades de la madera	46
1.3.6 Asignación de clases visuales y clases resistentes	58
1.4 Ensayos no destructivos	61
1.4.1 La resistografía.....	61

1.4.2	Vibraciones inducidas.....	62
1.4.3	Resistencia a la penetración (Pilodyn).....	62
1.4.4	Gamma densitometría	63
1.4.5	Fractómetro	63
1.4.6	Redes neuronales	63
1.4.7	Extracción de tornillos.....	63
1.4.8	El método de ultrasonidos	64
2	OBJETIVOS	67
3	EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE MADERA SOMETIDOS A FLEXIÓN	69
3.1	Metodología. Técnicas y trabajo experimental realizado	69
3.1.1	Materiales empleados	69
3.1.2	Técnicas empleadas y trabajo experimental realizado.....	70
3.2	Resultados y análisis de los resultados obtenidos.....	76
3.2.1	Caracterización visual y resistente	76
3.2.2	Caracterización física	79
3.2.3	Ensayos estáticos a flexión. Caracterización mecánica	82
3.2.4	Ensayo dinámico de impacto.....	103
3.3	Conclusiones	128
4	EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA SOMETIDOS A COMPRESIÓN LONGITUDINAL A LAS FIBRAS	131
4.1	Introducción	131
4.1.1	Objetivos	132
4.1.2	Materiales y métodos	132
4.2	Resultados obtenidos.....	133
4.3	Análisis y discusión de los resultados	134
4.3.1	Tensiones de rotura y módulos de elasticidad	134

4.3.2	Diagramas tensión - deformación y forma de rotura	134
4.3.3	Correlaciones entre las variables mecánicas.....	137
4.4	Conclusiones	141
5	EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA SOMETIDOS A COMPRESIÓN TRANSVERSAL A LAS FIBRAS.....	143
5.1	Introducción	143
5.1.1	Objetivos	144
5.1.2	Materiales y métodos	144
5.2	Resultados obtenidos.....	145
5.3	Análisis y discusión de los resultados	146
5.3.1	Tensiones de rotura y módulos de elasticidad	146
5.3.2	Diagramas tensión deformación y forma de rotura	147
5.3.3	Correlaciones entre las variables mecánicas.....	150
5.4	Conclusiones	154
6	EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE MADERA DE PINO INSIGNE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA SOMETIDOS A COMPRESIÓN TRANSVERSAL A LAS FIBRAS.....	157
6.1	Introducción	157
6.1.1	Objetivos	158
6.1.2	Materiales y métodos	158
6.2	Resultados obtenidos.....	158
6.3	Análisis y discusión de los resultados	159
6.3.1	Tensiones de rotura y módulos de elasticidad	159
6.3.2	Diagramas tensión deformación y forma de rotura	160
6.3.3	Correlaciones entre las variables mecánicas.....	163
6.4	Conclusiones	168

7	EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA SOMETIDOS A COMPRESIÓN LONGITUDINAL A LAS FIBRAS	171
7.1	Introducción	171
7.1.1	Objetivos	172
7.1.2	Materiales y métodos	172
7.2	Resultados obtenidos.....	173
7.3	Análisis y discusión de los resultados	175
7.3.1	Tensiones de rotura y módulos de elasticidad	175
7.3.2	Diagramas tensión deformación y forma de rotura	175
7.3.3	Correlaciones entre las variables mecánicas.....	178
7.4	Conclusiones	185
8	CONCLUSIONES.....	187
9	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	189
	BIBLIOGRAFÍA	191
	ANEXOS.....	199

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Relaciones de resistencia/densidad para algunos materiales estructurales.	6
Tabla 1.2. Coeficientes de correlación entre la resistencia y características no destructivas.	23
Tabla 1.3. Correlación (R^2) entre densidad, ancho anual del anillo y ratio de madera joven.	25
Tabla 1.4. Relación entre la resistencia y el MOE de 40 x 145 mm en píceas noruegas expresado como coeficiente de determinación (R^2).	26
Tabla 1.5. Coeficientes de correlación de varias investigaciones de la relación entre el MOE y la densidad para la madera picea noruega (<i>Picea abies</i>).	27
Tabla 1.6. Especificaciones para piezas de madera de coníferas españolas de $b \leq 70$ mm.	59
Tabla 1.7. Clases resistentes por especie y clases visuales para coníferas españolas.	60
Tabla 1.8. Valores característicos en función de la clase resistente.	60
Tabla 3.1. Clasificación visual y resistente de las tablas “Como Cae” (CC).	77
Tabla 3.2. Clasificación visual y resistente de las tablas “de Tercera” (TA)..	77
Tabla 3.3. Clasificación visual y resistente de las tablas “de Cuarta” (CA).	77
Tabla 3.4. Correspondencia entre clasificación comercial y visual considerando toda la tabla.	78
Tabla 3.5. Correspondencia entre la clasificación comercial y visual considerando el tercio central de la tabla.	78
Tabla 3.6. Características físicas. Tablas CC.	80
Tabla 3.7. Características físicas. Tablas TA.	81
Tabla 3.8. Características físicas. Tablas CA.	82
Tabla 3.9. Ensayos estáticos a flexión. Desplazamientos.	83

Tabla 3.10. Resultados de los ensayos físicos y mecánicos en las tablas CC.	88
Tabla 3.11. Resultados de los ensayos físicos y mecánicos en las tablas TA.	89
Tabla 3.12. Resultados de los ensayos físicos y mecánicos en las tablas CA.	89
Tabla 3.13. Valores medios agrupados por clases resistentes considerando toda la tabla.	90
Tabla 3.14. Valores medios agrupados por clases resistentes considerando el tercio central.	90
Tabla 3.15. Valores medios agrupados por clases comerciales.	91
Tabla 3.16. Ecuaciones de las rectas de regresión y correlaciones E - ρ .	92
Tabla 3.17. Microdeformaciones medidas a L/2, L/3 y L/6. Carga estática al centro.	95
Tabla 3.18. Microdeformaciones medidas a L/2, L/3 y L/6. Carga estática a tercios.	97
Tabla 3.19. Microdeformaciones en cara inferior (ϵ_i) y superior (ϵ_s) a L/2 de la tabla TA12 (37).	98
Tabla 3.20. Resultados ensayo dinámico tablas CC. Energía de impacto 60 (J).	106
Tabla 3.21. Resultados ensayo dinámico tablas CA. Energía de impacto 60 (J).	106
Tabla 3.22. Resultados ensayo dinámico tablas TA. Energía de impacto 60 (J).	107
Tabla 3.23. Resultados ensayo dinámico tablas CC. Energía de impacto 120 (J).	107
Tabla 3.24. Resultados ensayo dinámico tablas CA. Energía de impacto 120 (J).	108
Tabla 3.25. Resultados ensayo dinámico tablas TA. Energía de impacto 120 (J).	108
Tabla 3.26. Resultados ensayo dinámico tablas CA. Energía de impacto 180 (J).	109
Tabla 3.27. Resultados ensayo dinámico tablas CC. Energía de impacto 180 (J).	109
Tabla 3.28. Resultados ensayo dinámico tablas TA. Energía de impacto 180 (J).	110
Tabla 3.29. Resultados ensayo dinámico tablas CC.	111
Tabla 3.30. Resultados ensayo dinámico tablas CA.	112
Tabla 3.31. Resultados ensayo dinámico tablas TA.	113
Tabla 3.32. Resumen de resultados. Ensayo dinámico.	113

Tabla 3.33. Coeficientes de determinación rigidez - aceleración.	115
Tabla 3.34. Coeficientes de determinación rigidez - desplazamiento.	117
Tabla 3.35. Deformaciones producidas en CC1(24) con cargas estáticas y dinámicas.	119
Tabla 3.36. Máximos valores de deformación durante los ensayos realizados.	122
Tabla 3.37. Relación entre las deformaciones de las fibras inferior y superior.	123
Tabla 3.38. Relación entre las deformaciones de fibras situadas en distintas secciones.	124
Tabla 4.1. Valores obtenidos en el ensayo de compresión longitudinal.	133
Tabla 4.2 Ecuaciones de las rectas de regresión, R y R ² entre las variables estudiadas.	141
Tabla 5.1 Valores obtenidos en el ensayo de compresión transversal.	146
Tabla 5.2. Ecuaciones de las rectas de regresión y coeficiente de correlación.	154
Tabla 6.1. Valores obtenidos en el ensayo de compresión transversal. Piezas de pino insigne.	159
Tabla 6.2. Ecuaciones de las rectas de regresión y el coeficiente de correlación.	167
Tabla 7.1. Valores obtenidos en el ensayo de compresión longitudinal y de ultrasonidos. Gran escuadría.	174
Tabla 7.2. Ecuaciones de las rectas de regresión y coeficiente de correlación.	184

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Organigrama de actuación para la prevención de la caída en altura según el INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité).	1
Figura 1.2. SPPB con barandillas principal e intermedia y rodapié de madera.	2
Figura 1.3. Orientación de las fibras alrededor de un nudo.	6
Figura 1.4. Estructura de la madera de un micronivel a un macronivel.	7
Figura 1.5. Anillos de crecimiento en una sección transversal de tronco de pino.	12
Figura 1.6. Albura y duramen en una sección transversal de tronco de pino.	13
Figura 1.7. Gradiente de humedad en una sección transversal de madera.	17
Figura 1.8. Fendas de secado en sección transversal de madera de pino.	18
Figura 1.9. Dibujo esquemático de la microestructura de la madera.	19
Figura 1.10. Sección de píceas noruegas. Distribución de la densidad y el MOE.	20
Figura 1.11. CWAR (Clear Wood Area) a lo largo de una pieza de madera picea noruega.	21
Figura 1.12. Distribución de la densidad y MOE longitudinal en una sección de madera píceas noruegas conteniendo madera comprimida.	22
Figura 1.13. Relación entre la resistencia a flexión de canto y el módulo de elasticidad para la píceas noruegas.	27
Figura 1.14. Pinar adulto de pino silvestre en la Sierra de Guadarrama, San Rafael, Segovia.	36
Figura 1.15. Ramificación en tercio superior del pino blanquillo o pino Valsain en la Sierra de Guadarrama, San Rafael, Segovia.	37
Figura 1.16. Sección transversal de madera de <i>Pinus sylvestris</i> .	38
Figura 1.17. Medición de los diferentes tipos de nudo.	47

Figura 1.18. Medición de nudos de cara.	47
Figura 1.19. Medición de nudos de canto.	48
Figura 1.20. Nudos de cara interna despreciables.	48
Figura 1.21. Nudo de cara interna no despreciables, en este caso se mide el nudo en el canto.	49
Figura 1.22. Medición de nudos cortados oblicuamente o transversalmente con salida perpendicular en cara (imagen izquierda) o canto (imagen derecha).	49
Figura 1.23. Nudos agrupados.	50
Figura 1.24. Medición de nudos agrupados.	50
Figura 1.25. Medición de la desviación de la fibra.	51
Figura 1.26. Medición de anchura máxima de los anillos de crecimiento para madera de procedencia española, en testas con presencia de medula y con ausencia de la misma.	52
Figura 1.27. Medición de fendas.	53
Figura 1.28. Medición de la profundidad máxima de las fendas en caso de presentarse fendas en una sola cara (caso a) y en caras opuestas (caso b).	53
Figura 1.29. Medición de gemas.	54
Figura 1.30. Medición de la curvatura en cara	55
Figura 1.31. Medición de la curvatura en canto	56
Figura 1.32. Medición del atejado.	56
Figura 1.33. Medición del alabeo.	57
Figura 3.1. Singularidades de la madera. Defectos observados para clasificación visual.	71
Figura 3.2. Ensayo a flexión de tablas de madera. Laboratorio Materiales de Construcción de la ETS de Edificación de Madrid.	73
Figura 3.3. Galga extensiométrica sobre tabla y amplificador de señal (QuantumX MX840).	73
Figura 3.4. Ensayo de impacto sobre tablas de madera.	75

Figura 3.5. Ensayo de impacto. Falsa escuadra para medir desplazamientos.	75
Figura 3.6. Imagen de la tabla CC4(33).	80
Figura 3.7. Imagen de las tablas TA9(31) y TA2(30).	81
Figura 3.8. Imagen de las tablas CA2(24).	82
Figura 3.9. Diagrama carga-flecha. Tabla CC1(37) carga al centro.	85
Figura 3.10. Diagrama carga-flecha. Tabla CC1(37) carga a tercios.	85
Figura 3.11. Diagrama carga-flecha. Tabla CA2(24) carga al centro.	86
Figura 3.12. Diagrama carga-flecha. Tabla CA2(24) carga a tercios.	86
Figura 3.13. Recta de regresión. E1 – ρ para todas las tablas.	92
Figura 3.14. Recta de regresión E1 – ρ . Tablas de clasificación comercial CC.	92
Figura 3.15. Recta de regresión E1 – ρ . Tablas de clasificación comercial TA.	93
Figura 3.16. Recta de regresión E1 – ρ . Tablas de clasificación comercial CA.	93
Figura 3.17. Ensayos estáticos TA12 (37). Microdeformaciones en L/2 carga al centro.	99
Figura 3.18. Ensayos estáticos TA12 (37). Microdeformaciones en L/2, carga a tercios.	99
Figura 3.19. Ensayos estáticos CC8(39). Evolución de las microdeformaciones en L/2.	100
Figura 3.20. Ensayos estáticos TA4(32). Evolución de las microdeformaciones en L/2.	101
Figura 3.21. Ensayos estáticos CC9(22). Microdeformaciones medidas en L/2, L/3 y L/6.	102
Figura 3.22. Ensayos dinámicos CC8(39). Aceleraciones.	104
Figura 3.23. Ensayos dinámicos CC9(22). Aceleraciones.	104
Figura 3.24. Ensayos dinámicos CA4(33). Aceleraciones.	105
Figura 3.25. Ensayos dinámicos TA8(33). Aceleraciones.	105
Figura 3.26. Relación entre la rigidez de las tablas y la máxima aceleración alcanzada en los ensayos de impacto de 60J.	114
Figura 3.27. Relación entre la rigidez de las tablas y la máxima aceleración alcanzada en los ensayos de impacto de 120J.	114

Figura 3.28. Relación entre la rigidez de las tablas y la máxima aceleración alcanzada en los ensayos de impacto de 180J.	115
Figura 3.29. Relación entre la rigidez de las tablas y el máximo desplazamiento alcanzado en los ensayos de impacto de 60J.	116
Figura 3.30. Relación entre la rigidez de las tablas y el máximo desplazamiento alcanzado en los ensayos de impacto de 120J.	116
Figura 3.31. Relación entre la rigidez de las tablas y el máximo desplazamiento alcanzado en los ensayos de impacto de 180J.	117
Figura 3.32. Tabla CC1(24). Microdeformaciones bajo cargas estáticas.	118
Figura 3.33. Tabla CC1(24). Microdeformaciones bajo cargas dinámicas 60J.	118
Figura 3.34. Tabla CC1(24). Microdeformaciones bajo cargas dinámicas 120J.	119
Figura 3.35. Tabla CC2. Deformaciones bajo cargas en ensayo estático.	120
Figura 3.36. Tabla CC2. Deformaciones bajo cargas de impacto de 120J.	121
Figura 3.37. Tabla CC2. Deformaciones bajo cargas de impacto de 180J.	122
Figura 3.38. Fotografías de la tabla TA2(30) durante los ensayos de impacto.	125
Figura 3.39. Fotografías de la tabla T51 durante los ensayos de impacto.	126
Figura 3.40. Fotografías de la tabla T34 durante los ensayos de impacto.	127
Figura 4.1. Elementos de madera trabajando a compresión longitudinal a las fibras.	131
Figura 4.2. Diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)a1.	134
Figura 4.3. Fotografía de la pieza CC1(27)a1 antes de la rotura.	135
Figura 4.4. Diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)b1.	136
Figura 4.5. Fotografía de la pieza CC1(27)b1 en el instante de la rotura.	136
Figura 4.6. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.	137
Figura 4.7. Correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad.	138
Figura 4.8. Correlación entre la tensión de rotura y la densidad.	138
Figura 4.9. Correlación entre la ductilidad en términos de deformación y de energía.	138

Figura 4.10. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de deformación.	139
Figura 4.11. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de energía.	139
Figura 4.12. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de deformación.	139
Figura 4.13. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de energía.	140
Figura 4.14. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de deformación.	140
Figura 4.15. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de energía.	140
Figura 5.1. Elementos de madera trabajando a compresión transversal a las fibras.	144
Figura 5.2. Diagrama tensión deformación de la pieza CC3(27)a1.	147
Figura 5.3. Fotografía de la pieza CC3(27)a1 antes de la rotura.	148
Figura 5.4. Diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)a3.	149
Figura 5.5. Imagen de la pieza CC1(27)a3 antes de la rotura.	149
Figura 5.6. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.	150
Figura 5.7. Correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad.	151
Figura 5.8. Correlación entre la tensión de rotura y la densidad.	151
Figura 5.9. Correlación entre la ductilidad en términos de deformación y la ductilidad en términos de energía.	151
Figura 5.10. Correlación entre el módulo de elasticidad y ductilidad en términos de deformación.	152
Figura 5.11. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de energía.	152
Figura 5.12. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de deformación.	152
Figura 5.13. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de energía.	153
Figura 5.14. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de deformación.	153

Figura 5.15. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de energía.	153
Figura 6.1. Imágenes del ensayo a compresión transversal. Piezas IN3a3 e IN3b4.	157
Figura 6.2. Diagrama tensión deformación de la pieza IN1b4.	161
Figura 6.3. Fotografía de la pieza IN1b4 después de la rotura.	162
Figura 6.4. Diagrama tensión deformación de la pieza IN2a3.	162
Figura 6.5. Fotografía de la pieza IN2a3 antes de la rotura.	163
Figura 6.6. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.	164
Figura 6.7. Correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad.	164
Figura 6.8. Correlación entre la tensión de rotura y la densidad.	165
Figura 6.9. Correlación entre la ductilidad en términos de deformación y la ductilidad en términos de energía.	165
Figura 6.10. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de deformación.	165
Figura 6.11. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de energía.	166
Figura 6.12. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de deformación.	166
Figura 6.13. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de energía.	166
Figura 6.14. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de deformación.	167
Figura 6.15. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de energía.	167
Figura 7.1. Muro entramado de madera de la segunda mitad del siglo XIX en Madrid.	171
Figura 7.2. Distintos momentos en el transcurso de los ensayos.	173
Figura 7.3. Diagrama tensión deformación de la pieza A3.	175
Figura 7.4. Fotografía de la pieza A3 antes y después de la rotura.	176
Figura 7.5. Fotografía de la pieza A27 antes y después de la rotura.	177
Figura 7.6. Fotografía de la pieza A29 antes y después de la rotura.	178

Figura 7.7. Correlación entre el módulo de elasticidad estático y la tensión de rotura.	179
Figura 7.8. Correlación entre el módulo de elasticidad estático y la densidad.	179
Figura 7.9. Correlación entre la tensión de rotura y la densidad.	180
Figura 7.10. Correlación entre la ductilidad en términos de deformación y la ductilidad en términos de energía.	180
Figura 7.11. Correlación entre el módulo de elasticidad estático y la ductilidad en términos de deformación.	180
Figura 7.12. Correlación entre el módulo de elasticidad estático y la ductilidad en términos de energía.	181
Figura 7.13. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de deformación.	181
Figura 7.14. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de energía.	181
Figura 7.15. Correlación entre el módulo de elasticidad estático y el módulo de elasticidad dinámico.	182
Figura 7.16. Correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la tensión de rotura.	182
Figura 7.17. Correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la ductilidad en términos de deformación.	182
Figura 7.18. Correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la ductilidad en términos de energía.	183
Figura 7.19. Correlación entre la densidad y el módulo de elasticidad dinámico.	183
Figura 7.20. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de deformación.	183
Figura 7.21. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de energía.	184

1 ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS

1.1 Introducción

En un breve análisis de los datos estadísticos relativos a la siniestralidad laboral, se puede constatar la importancia significativa que tienen los accidentes laborales en general y los producidos por caídas en altura en particular, llegando a constituir, en el sector de la construcción, más de la tercera parte de los accidentes mortales y ocupando el primer lugar en lo que se refiere a los riesgos de accidente identificados, con un 59,3% (INSHT, 2012).

Figura 1.1. Organigrama de actuación para la prevención de la caída en altura según el INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité).

Todas las tendencias en materia de seguridad y prevención apuntan hacia la prevención como el principio básico más eficaz para la reducción de la siniestralidad y consideran prioritaria la implementación de protecciones colectivas (PC) frente a las personas (BOE, 1995 ; INRS, 2012 ; OPPBTP, 1984 ; Part, 1998), por tanto, los sistemas provisionales de protección de borde (SPPB) (figura 1.1), se manifiestan como uno de los mejores aliados frente a este problema (González, 2010)

En el sector de la construcción, es muy habitual el empleo de la madera como parte integrante de estos sistemas y de otros medios auxiliares de edificación (MAE), siendo la madera de pino silvestre la más utilizada en la zona centro de España (figura 1.2).

Figura 1.2. SPPB con barandillas principal e intermedia y rodapié de madera.

El articulado de la normativa vigente se encuentra repleto de expresiones poco precisas tales como: adecuados, sólidos y estables o suficientemente resistentes, cuando hace referencia al comportamiento mecánico de los elementos de seguridad y sus componentes.

La norma UNE-EN 13374 (AENOR, 2013) especifica que la madera empleada en SPPB debe poseer como mínimo la clase resistente C16. La obtención de la clase resistente de la madera empleada en construcción para PC y MAE mediante el empleo de las normas UNE 56544 (AENOR, 2011b), UNE-EN 1912 (AENOR, 2012) y UNE-EN 338 (AENOR, 2016) dejaría

prácticamente fuera de uso a todos los elementos empleados en la práctica, que suelen ser de madera de cuarta, a la que no se le puede asignar una clase resistente debido a los defectos que presenta.

Existe abundante información acerca del comportamiento estructural de la madera aserrada de gran escuadría de pino silvestre (Arriaga et al., 2005; Hermoso et al., 2002). Este extremo se explica dada la extendida utilización de la madera en elementos estructurales de edificación. Sin embargo, no se ha encontrado documentación relativa al comportamiento de elementos de pequeña escuadría, que son los que habitualmente se utilizan en SPPB y en MAE.

Los ensayos necesarios para poder determinar de manera precisa las propiedades mecánicas de una madera, por un lado imposibilitarían su posterior utilización ya que se trata de ensayos destructivos y por otro lado, incrementarían de forma importante el valor del material.

Debido a esto, habitualmente se han utilizado diferentes métodos de predicción de la calidad del material, no destructivos, siendo la clasificación visual el método más usado por el sector para decidir sobre la calidad mecánica de la madera, fundamentalmente por su sencillez y por su bajo coste.

Una de las primeras normas de clasificación visual de la madera tuvo lugar en los años 20 y fue desarrollada y publicada por el Forest Products Laboratory de Madison (EEUU). Posteriormente aparecieron diferentes normas de clasificación visual en Europa, entre las que cabe destacar las normas alemanas (DIN), inglesas (BSI), francesas (AFNOR), etc., teniendo todas ellas en común un principio altamente conservador (Hermoso, 2001).

Esta situación ha venido provocando un doble efecto, por un lado conduce a eficacias muy bajas en los resultados de la clasificación (porcentaje de acierto), pocas veces se supera el 50%, consecuencia de lo cual el beneficio económico de la comercialización del producto se ve claramente reducido. Por otro lado, se suele ofertar al mercado un producto cuyas cualidades, elastomecánicas están muy por encima de las exigencias preestablecidas.

La madera es un material que presenta un índice de variabilidad de sus propiedades muy elevado de forma general y de sus propiedades mecánicas de forma particular, debido a diferentes causas tales como, la herencia genética, las avanzadas prácticas en el manejo silvícola y el procesamiento industrial, manifestándose no solo entre árboles de diferentes especies sino también dentro de una misma especie, dentro de una misma masa forestal e incluso dentro del mismo árbol. Resultan ser muy habituales variaciones de algunas propiedades que oscilan entre el 30 y el 40%, medidas a través del coeficiente de variación, lo que ha obligado a clasificar la madera en grupos y/o calidades a los que se les asigna una supuesta resistencia con un aceptable nivel de seguridad.

Las variables que se utilizan para la clasificación en la Norma UNE- EN 338 (AENOR, 2016) a los efectos de definir grupos de calidad homogénea son el Módulo de Rotura a la flexión (MOR), el Módulo de elasticidad a flexión (MOE) y la densidad.

1.2 Morfología y propiedades de la madera

Se puede definir la madera como el producto del crecimiento secundario (Xilema) de algunas plantas a las que se denominan leñosas.

La madera ha sido usada permanentemente en la construcción a lo largo de la historia de la humanidad, ya sea como materia prima principal en la edificación, como material para acabados o como parte integrante de los MAE y sistemas de PC, que es el caso que ocupa en este trabajo.

1.2.1 Anatomía de la madera

La “sabia naturaleza” ha dotado a los árboles de una estructura que cumple de manera eficaz su función vital. Por un lado, configura un sistema capaz de soportar los esfuerzos a los que se ve sometido el árbol en su crecimiento. Por otro lado, la disposición de una serie de células huecas crea un sistema capaz de transportar sustancias e incluso almacenar sustancias de reserva. Las

funciones de soporte de las células dependen fundamentalmente de la composición y organización de las paredes celulares.

Las paredes de estas células en forma tubular se componen a su vez de una sustancia amorfa o matriz, conocida con el nombre de lignina, en la que se encuentra embebida la celulosa que es otra sustancia de estructura fibrosa y muy entrelazada. Estas células de aspecto fibroso se agrupan formando haces, se entrelazan y se repiten formando una estructura a distintos niveles y de formas diferentes. La mayor parte de estas fibras crecen orientadas en la dirección longitudinal y paralela al eje del tronco del árbol, pero también existen otras que comunican los diferentes haces longitudinales con una disposición radial y que cumplen un efecto de atado o zunchado.

El crecimiento repetitivo de esta estructura es en gran medida el responsable de las excelentes propiedades que ofrece la madera aserrada para su uso en construcción. Al mismo tiempo, también lo es de todo aquello que en muchas ocasiones consideramos como defectos, tal es el caso de los nudos, que son el resultado de la inserción en el tronco de la misma estructura para dar lugar al crecimiento de las ramas.

La estructura de la madera forma un compuesto de fibras de alta calidad, óptimamente diseñado para resistir las cargas que actúan sobre el árbol, pero también para transportar el agua y los agentes nutritivos. El tronco y las ramas del árbol están diseñados para resistir las cargas gravitatorias y del viento. La estructura de la madera está adaptada para conseguir una resistencia máxima en las direcciones sometidas a las solicitaciones mientras que en las otras direcciones la resistencia es muy baja. Las células de la madera en las coníferas tienen forma oblonga, con una longitud del orden de 2-4 mm y un cociente longitud/diámetro de 100. Están predominantemente orientadas en una dirección, llamada dirección de la fibra o dirección granular. Ésta es la dirección más resistente, generalmente paralela al eje del tronco. En la cercanía de las ramas, las fibras están redirigidas para formar uniones estructurales (figura 1.3) muy eficientes entre el tronco y las ramas (Foley, 2001; Thelandersson & Larsen, 2003).

Figura 1.3. Orientación de las fibras alrededor de un nudo.

En las coníferas, la fibra estructural situada en las zonas predominantemente comprimidas (por ejemplo, en la parte baja de las ramas) es diferente del resto de la madera y está optimizada para resistir las solicitaciones de compresión. Bajo unas condiciones especiales de crecimiento, puede formarse en el tronco una fibra estructural similar, especialmente en la parte baja del árbol. Este tipo de madera se conoce como madera de compresión.

La resistencia y rigidez en la dirección de la fibra es muy alta en relación al peso del material, especialmente bajo solicitaciones de tracción. La tabla 1.1 muestra una comparativa de relaciones entre la resistencia y la densidad para los materiales estructurales más habituales.

Tabla 1.1. Relaciones de resistencia/densidad para algunos materiales estructurales.

Material	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia (MPa)	Resistencia/Densidad (10 ³ MPa·m ³ /kg)
Acero estructural (compresión o tracción)	7800	400-1000	50-130
Aluminio (compresión o tracción)	2700	100-300	40-110
Hormigón (compresión)	2300	30-120	13-50
Madera de conífera (tracción)	400-600	40-200	100-300
Madera de conífera (compresión)	400-600	30-90	70-150
Madera estructural (tracción. Con defectos)	400-600	15-40	30-80
Fibra de vidrio en epoxi (tracción)			500
Fibra de carbón en epoxi (tracción)			1000

Para la madera sin defectos la relación resistencia/densidad es significativamente superior a la de otros materiales de construcción. Además, en el caso de la madera estructural, donde los defectos naturales reducen su resistencia, la resistencia en relación al peso es del mismo orden de magnitud que para el acero estructural estándar. La relación resistencia/densidad es más ventajosa para los polímeros sintéticos reforzados con fibras, pero el precio de estos productos es también significativamente mayor.

La sucesión de la estructura de la madera de un nivel microscópico a macroscópico se muestra en la figura 1.4.

Figura 1.4. Estructura de la madera de un micronivel a un macronivel.

1.2.2 Propiedades de la madera

1.2.2.1 Anisotropía

La madera es un material natural con una estructura que se puede caracterizar como ortotrópica y heterogénea. Como material ortotrópico, posee tres direcciones principales: longitudinal (en la dirección de las fibras), radial (perpendicular a los anillos de crecimiento) y tangencial (tangencial a los anillos de crecimiento). La estructura de la madera es fibrosa y orientada, con distintas propiedades según las tres direcciones principales: axial, radial y tangencial; donde el módulo de elasticidad a tracción difiere del de compresión (Baño et al.; 2012). La evolución natural de la madera ha diseñado un material con propiedades mucho más favorables en la dirección paralela a la fibra, ya que en esta dirección se orientan la mayor parte de las tensiones generadas en el interior del tronco de un árbol para cumplir su función estructural. En cuanto a la dirección perpendicular a las fibras, el árbol no tiene por qué soportar grandes esfuerzos, por lo que no ha desarrollado demasiados mecanismos para afrontarlos.

Este fenómeno que se denomina anisotropía (las propiedades físicas y mecánicas dependen de la dirección considerada) es posiblemente uno de los aspectos que más diferencian a la madera de otros materiales y debe tenerse siempre presente al interpretar su comportamiento estructural. Se puede estimar que el comportamiento de la madera para cualquier propiedad física o mecánica en dirección paralela a la fibra es más favorable que en dirección perpendicular, en un orden de magnitud de 10 a 80 veces. Así por ejemplo la resistencia a tracción es 30-50 veces menor en la dirección perpendicular a la fibra que en la dirección de la fibra. La falta de resistencia mostrada por la madera en las direcciones transversales a la fibra siempre debe ser considerada con detalle en el diseño de las estructuras de madera.

Los fallos de las estructuras de madera se deben frecuentemente a esfuerzos de tracción perpendiculares a la fibra, que comúnmente se dan en elementos curvos, uniones en estructuras de madera y discontinuidades creadas por agujeros y marcas en piezas de madera. La capacidad de carga efectiva de elementos de madera bajo tracción perpendicular a la fibra

depende de la magnitud del volumen de la pieza (Barrett, 1974). En esta tesis doctoral se han dedicado dos capítulos a este tipo de solicitud.

Por otra parte la madera aserrada en dimensiones estructurales es un material no homogéneo, que contiene defectos del crecimiento en forma de nudos, zonas con madera de compresión, orientación oblicua de fibra, etc. Estas características de crecimiento, que fueron una vez creadas para atender las necesidades del árbol, reducen la resistencia, especialmente cuando la madera es aserrada y usada con misión estructural. Lo anterior se describe excelentemente en las siguientes líneas (Madsen, 1992):

“La madre naturaleza invierte millones de años trazando una disposición donde las ramas crecen perpendiculares al tallo del árbol sin perjudicar la resistencia de la rama y manteniendo toda la resistencia del tallo... Es bien conocido que las varas hechas del tallo son muy fuertes pero cuando cortamos por los nudos viendo el intrincado trabajo de la madre naturaleza, lo que era un eficiente patrón para sujetar las ramas se convierte en una gran debilidad. La interconexión de las fibras queda destruida, dejando las fibras sueltas donde la tensión perpendicular a la fibra puede iniciar una rotura”.

Por lo tanto, el comportamiento mecánico de la madera no puede ser deducido con fiabilidad de las propiedades de la madera sin defectos. De hecho, la presencia y el carácter de nudos y otros defectos varían de una tabla de madera a otra, lo que significa que las propiedades estructurales de la madera aserrada muestran una variabilidad significativa. Las propiedades resistentes de la madera estructural por lo tanto son normalmente determinadas por ensayos directos de elementos de madera de acuerdo con una metodología estandarizada, y la resistencia queda definida a un nivel de elemento más que de material. Los datos de resistencia asociados con la madera estructural reflejan la capacidad a flexión, tracción, compresión y cortante de un elemento, incluso si los datos están expresados en unidades de solicitud y obtenidos asumiendo que la teoría de la elasticidad es válida. La influencia de los defectos está implícitamente incluida en los valores de resistencia especificados. Ésta es la razón por la que son válidos diferentes valores de resistencia para distintos tipos de cargas como flexión, tracción y compresión.

Cuando la madera va a ser usada para propósitos estructurales, se requiere algún tipo de evaluación no destructiva de la resistencia (o clasificación) para garantizar la seguridad de la estructura. Históricamente, el método más empleado ha sido la *clasificación visual* de cada elemento de madera, siguiendo reglas específicas. Hoy en día se emplean métodos de *clasificación mecánica* a pesar de que la clasificación visual es todavía muy común en la práctica. Para todos los tipos de métodos de clasificación lo habitual es que a partir de una o varias propiedades representativas que se aprecian usualmente en cada elemento de madera se deduzcan las propiedades que indican la resistencia del elemento. El procedimiento anterior es posible porque existe una correlación entre las propiedades observadas y las características resistentes de la madera. Esta correlación generalmente no es muy alta, lo que significa que hay una incertidumbre asociada al procedimiento de clasificación que tiene que ser considerada.

El hecho de que la capacidad de carga de la madera esté muy condicionada por la presencia y características de defectos de crecimiento aleatorios, implica que la resistencia de elementos de madera también depende del tamaño de los elementos estructurales en sí, y de la forma en que se cargan.

El conocimiento actual de los procesos de fractura relacionados con tensiones perpendiculares a la fibra es limitado. En ingeniería de estructuras se emplean reglas empíricas de detalle, para evitar el riesgo de fallo por tensión perpendicular a la fibra, como las recomendaciones de distancias mínimas entre tornillos en uniones mecánicas. La fiabilidad de estos métodos de diseño es limitada, especialmente cuando se aplican a situaciones reales a gran escala donde existe una gran diferencia con los resultados de los ensayos de laboratorio.

La mecánica de la fractura es una línea prometedora de investigación que ha contribuido en los últimos años significativamente a un mejor entendimiento y mayor fiabilidad de métodos de diseño que conciernen al fallo en el sentido perpendicular de la fibra.

La fuerte anisotropía de la madera influye también notablemente en las propiedades relacionadas con la rigidez. El módulo de elasticidad perpendicular a la fibra es normalmente 50-80 veces más pequeño que el paralelo a la fibra. Cuando la madera es expuesta a compresión perpendicular a la fibra, suceden deformaciones significativas incluso con bajos niveles de carga.

1.2.2.2 Anillos de crecimiento

En cada periodo vegetativo del árbol se forma una nueva capa de células formando un círculo concéntrico sobre las del año anterior y que van conformando la madera. Realizando un corte transversal del tronco se aprecia visualmente una serie de anillos concéntricos, cuyo número coincide con el número de años de la vida del árbol. El cambium, que es un conjunto de células localizadas debajo de la corteza, es el responsable de la generación de las nuevas células que hacen crecer el tronco en diámetro. Cada año se genera una nueva capa de células hacia el interior del tronco, incorporándose las células generadas hacia el interior de la madera, y otra nueva capa hacia el exterior, transformándose en este caso las células en corteza que, con el tiempo, terminará por desprenderse.

Observando una sección transversal de un tronco (figura 1.5) se distinguen diferencias de espesor y tonalidad en cada anillo anual. En primavera, al iniciarse las buenas condiciones ambientales, se produce un crecimiento rápido originando células grandes. Según avanza la estación hacia el verano, van disminuyendo las necesidades vitales del árbol permitiendo únicamente el crecimiento lento de células pequeñas, siendo éstas más estrechas y de paredes más gruesas y duras. Durante el otoño y el invierno el crecimiento se paraliza casi por completo. Este fenómeno repercute en el tipo de madera que se genera en cada periodo estacional. La madera de primavera resulta menos densa por su rápido crecimiento y la madera de verano es más densa y más resistente.

Además, los anillos no resultan iguales todos los años, dependiendo de las variaciones climáticas dentro de cada estación. Los años lluviosos y benignos generan anillos más anchos y los secos producen anillos más estrechos.

Figura 1.5. Anillos de crecimiento en una sección transversal de tronco de pino.

Otro elemento que influye, dentro del mismo tronco, en la calidad de la madera es la diferencia de edad de cada zona. Los anillos que se generan en los primeros años de vida del árbol son los más próximos al eje del tronco y han crecido rápidamente con la intención, casi exclusivamente funcional, de iniciar en un breve plazo el desarrollo del árbol como tal. Por este motivo se produce una madera juvenil que se caracteriza por su muy baja calidad, siendo sus células muy blandas y poco resistentes, resultando la médula, que es la madera formada en el primer anillo de crecimiento, la de peor calidad.

1.2.2.3 Albura y duramen

La madera más joven de un árbol la genera el cambium que, corresponde al tejido específico de las plantas leñosas, situado entre la corteza y el leño, originando los últimos anillos de crecimiento, que son los responsables de la mayoría de las funciones vitales del tronco del árbol, como el transporte de sustancias y el almacén de reservas. Esta madera se la denomina albura y es más blanda y ligera, de coloración más clara, más permeable y con un contenido mayor de humedad que el duramen.

Los anillos se van acumulando con los años y la madera de la parte interna del leño va cesando en su actividad conductora, reduciendo sus funciones vitales. Las células del centro del árbol mueren, sufriendo entre otros cambios la obstrucción por acumulación de sustancias, generando una madera más oscura, pesada y dura, que se conoce como duramen. A este proceso de envejecimiento de las células se le denomina duraminización.

La porción externa, más clara y con células vivas es la madera de albura. Tiene como propiedades específicas que se trata de una madera menos resistente que la de duramen, al tratarse de células más blandas y ligeras y, menos dura, siendo por esta razón más propensa a ataques por agentes xilófagos. El duramen está más protegido contra el ataque de estos agentes debido a que sus células más duras y pesadas están formadas por células muertas rellenas de goma, resina y materiales colorantes y en muchos casos de agentes tóxicos y repelentes que las protegen contra hongos e insectos (figura 1.6).

Figura 1.6. Albura y duramen en una sección transversal de tronco de pino.

1.2.2.4 Higroscopicidad

Uno de los componentes moleculares de la madera, al igual que en el resto de los seres vivos, es el agua. Hay dos tipos de agua en el interior de la madera: el agua de constitución o de saturación, que se encuentra retenida

dentro formando parte de la propia estructura molecular de la madera y la llamada agua libre, que se encuentra dentro de los huecos celulares en forma líquida y que se produce cuando las paredes celulares están saturadas.

Las variaciones en el contenido de humedad de una madera se refieren al agua libre y al agua de impregnación ya que el agua de constitución solo puede eliminarse destruyendo la madera y reduciéndola por carbonización a cenizas.

El agua libre altera sólo el peso específico aparente. En lo que se refiere a las propiedades físicas y mecánicas, el contenido de humedad que influye en la madera es el debido al agua que impregna las paredes celulares. El contenido de humedad en la madera se expresa como porcentaje de agua en peso respecto al peso seco de la madera. Valores inferiores al 30% indican que toda el agua existente en la madera se encuentra impregnando las paredes celulares y que no existe agua libre. Con valores superiores por encima del 30% de humedad existe agua libre ocupando los huecos celulares y la madera comienza a hincharse por el vapor de agua y a modificar su volumen, llenando las paredes celulares hasta que están completamente impregnadas o saturadas. A este valor del contenido de humedad, próximo al 30%, se le denomina punto de saturación de la fibra (PSF), y resulta ser un valor muy similar para todas las especies de madera (Herrero, 2003).

Cuanto mayor es el contenido de humedad menor es la resistencia y mayor es la deformación que se produce por fluencia. Además, con variaciones de humedad en la madera se producen ciertas variaciones dimensionales.

La higroscopicidad de la madera es la capacidad de ésta de absorber la humedad atmosférica. La madera está en constante intercambio de humedad. Puede perder agua por evaporación cuando las condiciones ambientales se lo demanden porque la temperatura es alta o porque la humedad relativa del aire es baja, o bien porque la madera se encuentre muy húmeda. También puede absorber vapor de agua cuando la madera está más seca que el ambiente hasta conseguir su equilibrio.

Una madera húmeda o verde que se expone al aire pierde en primer lugar el agua libre y, cuando la ha perdido toda, empezará a perder una cierta

cantidad del agua de impregnación. Si las condiciones ambientales, de temperatura y humedad relativa del aire, son estables llega un momento en que la humedad de la madera alcanza su equilibrio con un determinado contenido de humedad. Cuando se llega a este punto se dice que la madera tiene un contenido de humedad de equilibrio higroscópico. Teniendo en cuenta este aspecto se han determinado las curvas de equilibrio higroscópico válidas para todas las especies de madera, con muy pequeñas variaciones.

Si se realiza el secado de la madera al aire, sin forzar las condiciones ambientales, se pueden alcanzar contenidos de humedad del orden del 12 al 16%. Para contenidos menores de humedad solo se consiguen realizando el secado con procesos artificiales.

La madera en condiciones ambientales contiene grandes cantidades de agua, la humedad contenida (peso del agua en relación al peso de la madera seca) puede ser del orden del 100% o más en la albura. Parte del agua es libre y almacenada en cavidades de la célula de la madera, el resto queda impregnada en las paredes celulares. Cuando la madera es secada, el agua libre desaparece primero, quedando alrededor del 30% de la humedad que puede contener una madera sin que exista agua libre. Este estado de la humedad se llama “punto de saturación de la fibra” y supone una frontera, ya que las propiedades mecánicas, resistencia y rigidez, según la madera se vaya secando por debajo de este punto de saturación aumentarán.

Un efecto especialmente importante en dirección perpendicular a la fibra es el de hinchazón y merma de la madera. Este efecto se debe a la variación del contenido de humedad que, al aumentar hincha las fibras aumentando el espesor de la pared celular y al disminuir las merma. No afecta a la longitud de la célula. Un orden de magnitud aproximado es de 20 a 40 veces mayor en dirección perpendicular a la fibra que en dirección longitudinal.

El siguiente comportamiento se puede entender teniendo en cuenta la estructura celular y fibrosa tubular de la madera. Durante el proceso de secado se origina una contracción superior en dirección tangencial que en dirección radial, ya que el intercambio de humedad que se produce entre las paredes celulares y el aire afecta al espesor de las paredes celulares y, como

consecuencia, al diámetro de cada fibra. Esto provoca la aparición de fendas, que resultan inevitables en piezas de escuadrías relativamente grandes. En cuanto a la dirección axial o paralela a la fibra los cambios de dimensiones son prácticamente despreciables.

Los fenómenos de hinchazón y merma son responsables de la inestabilidad dimensional de la madera. Se producen principalmente con variaciones en el contenido de humedad por debajo del 30% o punto de saturación de la fibra, ya que los cambios de humedad debidos al intercambio del agua libre que ocupa los huecos celulares no afectan a las dimensiones de las paredes celulares. Las variaciones dimensionales debidas a estos fenómenos tienen lugar principalmente en el tamaño de la sección, siendo prácticamente despreciables en su longitud.

La madera es higroscópica e interactúa con la humedad del ambiente. La humedad contenida en un elemento de madera siempre busca un equilibrio tratando de igualar a la humedad relativa de su alrededor. Los elementos de madera empleados en edificación están normalmente expuestos a condiciones climáticas cambiantes de naturaleza más o menos aleatoria. La respuesta de un elemento de madera es bastante lenta, de modo que el promedio de humedad contenida en una sección transversal en tamaños estructurales, responderá ante cambios de humedad después de semanas o meses. Esta lentitud en la respuesta implica que la distribución de la humedad en elementos de madera es no uniforme. La figura 1.7 muestra el cambio continuo en la distribución de la humedad sobre el ancho de una sección transversal de madera laminada, expuesta a la humedad ambiente y resguardada de la lluvia directa durante 45 semanas empezando en noviembre (Jönsson, 2001).

La presencia de gradientes de humedad del tipo mostrado en la figura 1.7 significa que las sollicitaciones inducidas por la humedad se desarrollarán en elementos de madera, debido a las resistencias a los cambios de tamaño. Estas sollicitaciones puede que estén presentes en todas las direcciones del material, pero son insignificantes en la dirección longitudinal, donde la resistencia es también alta.

Figura 1.7. Gradiente de humedad en una sección transversal de madera.

Es frecuente la rotura de la superficie de elementos de madera debido a la no uniformidad de las solicitaciones inducidas por la humedad. La presencia de solicitaciones internas debido a la humedad tiene una gran influencia en la capacidad de carga asociada a los fallos con tracciones perpendiculares a la fibra. El hecho de que las solicitaciones internas producidas por la humedad estén siempre más o menos presentes en estructuras de madera no está considerado normalmente en el diseño de estructuras, lo que implica que las predicciones de fallo debidas a tracciones perpendiculares a la fibra están asociadas a una gran incertidumbre. Probablemente, debido a esta razón, se dan con gran frecuencia fallos accidentales de este tipo en la práctica.

1.2.2.5 Fendas de secado

Cuando la madera se somete a un proceso de secado y de una manera especial, cuando este secado es demasiado brusco, la hinchazón y merma en dirección tangencial puede ser del orden del doble que en dirección radial (figura 1.8). Como consecuencia se produce la apertura de fendas de secado.

Figura 1.8. Fendas de secado en sección transversal de madera de pino.

En una sección enteriza que contiene el corazón del árbol el corte es básicamente tangencial en las caras y radial en el plano medio. En las caras exteriores se produce más rápido el secado que en el centro de la sección de forma que, la dirección tangencial merma más deprisa y en mayor medida que la radial. Este fenómeno provoca la rotura en forma de fendas y es tanto mayor cuanto mayor sea el tamaño de la sección. Existen otras deformaciones en piezas de madera, como los alabeos o atejamientos, que tienen un origen similar.

Es muy raro que las fendas de secado atraviesen la sección en su totalidad. Si las fendas atraviesan completamente la sección éstas no llegan a desarrollarse en una longitud excesiva, lo que permite suponer que toda la pieza sigue trabajando como un elemento único. Las fendas normales de secado apenas disminuyen la capacidad resistente de una viga o un pilar cuando se trata de elementos de gran escuadría. En esta aseveración se basan algunas normas europeas de clasificación de madera para uso estructural que no consideran crítico el criterio de fendas.

1.2.2.6 Propiedades de la madera sin defectos. Interrelación y variación

Si se atiende a la microestructura de la madera se puede considerar ésta, como compuesta de pequeños tubos unidos y contiguos (figura 1.9). El ancho del tubo así como el espesor de la pared pueden variar, pero las propiedades

de la pared del material son muy similares en todas las especies de madera. Esto en particular es aplicable a la densidad de la pared del material, que está en torno a 1500 kg/m^3 (Kollman & Côté, 1968). Esto significa que las propiedades del material madera como el módulo de elasticidad (MOE o E), la resistencia a lo largo de la fibra y la densidad están fuertemente condicionadas por el espesor de la pared de la célula o tubo. Esto explica por qué la correlación entre las propiedades de la madera sin defectos es, en general, muy buena. Para muestras pequeñas, sin defectos de píceas noruegas (*Picea abies*), Foslie (Foslie, 1971), encontró el siguiente coeficiente de determinación de valores (R^2):

- Resistencia a flexión vs módulo de elasticidad... $R^2 = 0,76$
- Resistencia a flexión vs densidad..... $R^2 = 0,66$
- Módulo de elasticidad vs densidad..... $R^2 = 0,64$

Figura 1.9. Dibujo esquemático de la microestructura de la madera.

En la madera, las propiedades no están uniformemente distribuidas, como se puede apreciar en la figura 1.10 (Steffen, Johansson & Wormuth, 1997),

donde se muestra la distribución de la densidad y el MOE en una sección de madera de picea noruega. En este caso particular, la densidad varía desde 400 hasta casi 600 kg/m³, y el MOE de 10000 a 22000 N/mm². Otros autores (Bengtsson, 2000; Dahlblom et al., 1999), han obtenido resultados similares a partir del ensayo de 3400 muestras pequeñas sin defectos de picea noruega, obteniendo que el MOE se incrementaba el doble desde la médula hacia fuera. La figura 1.10 y los resultados de otros autores (Wormuth, 1993) indican que la densidad varía menos. Wormuth también presenta ejemplos donde la densidad es casi constante en toda la sección transversal de la madera, pero donde el MOE aumenta desde 6000 N/mm² en la médula hasta 12000 N/mm² en una esquina exterior de una sección transversal de 67x195 mm de madera picea noruega. Esto, en cierta manera, contradice lo que se había apuntado anteriormente acerca de la buena correlación entre el MOE y densidad, e indica que hay otros factores importantes que controlan la relación, como por ejemplo el ángulo de la microfibras en la capa S2 (Persson, 2000). La densidad se distribuye de una manera muy uniforme, pero el MOE cae desde el duodécimo anillo de crecimiento hasta la médula debido al gran aumento en el ángulo de la microfibras (Ormarsson et al., 1999).

Figura 1.10. Sección de picea noruega. Distribución de la densidad y el MOE.

1.2.2.7 Defectos en la madera

La madera normalmente presenta defectos de varios tipos: nudos, madera de compresión, inclinación de la fibra, descomposición, fendas, y bolsas de resina. Los nudos son un defecto muy grave ya que pueden reducir drásticamente la resistencia y habitualmente están presentes en gran número de piezas de madera (Johansson, 1998).

En los ensayos de flexión o tracción hasta rotura, el fallo suele producirse por los nudos. En ensayos sobre madera de secuoya de 2x6 pulgadas (*Sequoia Sempervirens*) se constató que en un 95% de los casos el fallo ocurría por los nudos o inclinación local de la fibra, que en la mayoría de los casos también estaba relacionada con los nudos (Schniewind & Lyon, 1971). Ensayos posteriores mostraron que el 91% de los fallos fueron causados por nudos, y solo el 1% por inclinación de la fibra (Johansson, 1998).

Los nudos pueden aparecer en grupo, que es el caso normal en especies como la píceas noruega, o en solitario, como por ejemplo en el abeto de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Isaksson (Isaksson, 1999) demuestra la presencia de nudos en madera píceas noruega usando el parámetro CWAR (Clear Wood Area), que es la parte libre de nudos de la sección transversal de la madera (figura 1.11).

Figura 1.11. CWAR (Clear Wood Area) a lo largo de una pieza de madera píceas noruega.

$CWAR = 100(1-TKAR)\%$, donde TKAR es la suma de las áreas localizadas del nudo proyectadas dentro de 150 mm del largo de la madera dividido por el área de la sección transversal (Isaksson, 1999).

Los nudos afectan a la resistencia de la madera tanto por la reducción de la sección transversal que causan como por el efecto de distorsión de la fibra implicada.

El uso de la inclinación de la fibra como parámetro de reducción de la resistencia no se refiere normalmente a desviaciones de la fibra relacionadas con nudos, sino a la inclinación general de la fibra que ocurre en ocasiones en tablas cortadas de troncos curvos o por la parte de debajo del tronco debido a la forma cónica del tronco por debajo (Perstoper, 1999).

La madera de compresión se desarrolla en zonas del tronco expuestas a grandes solicitaciones de compresión durante el crecimiento, a veces debido al viento, y pueden ser observadas en anillos anuales con un color más oscuro y una ligera forma excéntrica. La madera comprimida solo existe en coníferas. A nivel microscópico, la madera comprimida solo puede ser distinguida de la madera normal por las paredes celulares más gruesas de la traqueida de la madera joven. El efecto es una fuerte reducción del MOE. Esto se puede comprobar en la figura 1.12, donde existe madera de compresión en la esquina superior izquierda de la sección transversal. La densidad está uniformemente distribuida, pero existe una caída pronunciada del MOE (Wormuth, 1993).

Figura 1.12. Distribución de la densidad y MOE longitudinal en una sección de madera de píceas noruega conteniendo madera comprimida.

1.2.3 Relación entre resistencia/rigidez y características de la madera que pueden ser medidas de forma no destructiva

1.2.3.1 Resumen General

La tabla 1.2 presenta un resumen de las relaciones entre las resistencias a flexión y tracción y una serie de características que pueden ser medidas de forma no destructiva (P Hoffmeyer, 1995). El estudio se ha realizado sobre madera de píceas noruega (*Picea abies*). La bondad de estas relaciones se indica con el coeficiente de determinación, R^2 . Como se puede comprobar, los valores de R^2 varían considerablemente entre investigaciones diferentes. Esto se debe principalmente a que el material y el método de ensayo difieren de unos casos a otros. Los números correspondientes a la fuente hacen referencia a los siguientes investigadores: 1 (Johansson, Brundin & Gruber, 1992), 2 (Hoffmeyer, 1984), 3 (Hoffmeyer, 1990), 4 (Lackner & Foslie, 1988), 5 (Glos & Heimeshoff, 1982), 6 (Johansson, 1976).

Tabla 1.2. Coeficientes de correlación entre la resistencia y características no destructivas.

Características que se pueden medir con ensayos no destructivos	Coeficiente de determinación R^2							
	Fuente	Resistencia a flexión				Resistencia a tracción		
		1	2	3	4	1	5	6
Nudos		0,27	0,20	0,16	0,25	0,36	0,42	0,30
Ancho de anillos		0,21	0,27	0,20	0,44	0,36	0,33	0,28
Densidad		0,16	0,30	0,16	0,40	0,38	0,29	0,38
MOE, flexión a tracción		0,72	0,53	0,55	0,56	0,70	0,69	0,58
MOE, viga plana, pequeña luz								0,74
Nudos y ancho de anillos combinados		0,37	0,42	0,39		0,49		
Nudos y densidad combinados		0,38		0,38		0,55	0,61	0,64
Nudos y MOE		0,73	0,58	0,64		0,70	0,76	0,78

1.2.3.2 Nudos

Los nudos, por sí solos, son un mal indicador de la resistencia. Los valores R^2 para la píceas noruega, en la tabla 1.2, varían entre 0,16 y 0,42. Si la localización de los nudos en las secciones transversales de la madera también se tiene en cuenta, la correlación puede ser mejorada considerablemente. Tan solo usando el valor de área del nudo se obtuvo un valor de R^2 de 0,32 para la secuoya (*Sequoia sempervirens*) ensayada a tracción (Schniewind & Lyon, 1971). Usando también información sobre la posición del nudo en la sección transversal de la madera, consiguieron mejorar la correlación a $R^2 = 0,50$. En estudios de la píceas noruega a tracción, sin embargo solo se obtuvo un valor del R^2 de 0,30 a 0,35 (Johansson, 1976).

En estudios sobre el abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) con diámetros de nudo variando de $\frac{3}{4}$ - $3 \frac{1}{4}$ pulgadas se obtuvieron valores de R^2 de 0,67 y 0,69, respectivamente, para la relación entre la resistencia y el tamaño del nudo (Kunesh & Johnson, 1972).

1.2.3.3 Densidad y espesor del anillo de crecimiento

Tanto la densidad como el espesor del anillo de crecimiento están considerados como parámetros indicadores de la resistencia y rigidez de la madera sin defectos. Sin embargo, la correlación con la resistencia de la madera es baja, con valores de R^2 variando de 0,16 a 0,40 para la densidad y de 0,20 a 0,44 para el ancho anual del anillo, de acuerdo con la tabla 1.2.

En un estudio de la relación entre la densidad, el ancho anual del anillo y el ratio de madera joven en píceas noruegas de ocho aserraderos diferentes (E – S) en Finlandia, Noruega y Suecia se concluyó que la correlación era modesta (Johansson et al., 1998). Sin embargo, cuando se analizaron las propiedades de cada aserradero individualmente, se verificó que la relación existía, pero dependiendo del origen de la madera (tabla 1.3). Cada muestra contenía aproximadamente 150 piezas.

Tabla 1.3. Correlación (R^2) entre densidad, ancho anual del anillo y ratio de madera joven.

Fuente	Densidad vs. ancho de anillo	Densidad vs. ratio madera joven	Ratio madera joven vs. ancho de anillo
E	0,38	0,51	0,64
G	0,20	0,12	0,06
H	0,28	0,39	0,48
I	0,21	0,15	0,08
K	0,18	0,40	0,47
L	0,38	0,09	0,15
M	0,38	0,42	0,64
S	0,30	0,16	0,24
All	0,25	0,12	0,26

1.2.3.4 Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad, que en muchas ocasiones se escribe abreviado como MOE es, con mucha diferencia, la propiedad que mejor predice la resistencia de la madera. El coeficiente de determinación de R^2 en la tabla 1.4 varía de 0,51 a 0,73. El valor más alto fue obtenido para un ensayo en un periodo relativamente corto en flexión en vigas planas ensayadas. En contraste con lo que se había observado para la densidad y el ancho anual del anillo, el coeficiente de correlación para la resistencia contra el MOE parecía ser independiente del origen de la madera (tabla 1.4). La función de regresión, sin embargo, puede variar considerablemente de un aserradero a otro. La constante A en la función de regresión simple varía de 2,78 para el aserradero “L” a 3,14 para el aserradero “I” (Johansson et al., 1998). Resultados similares fueron obtenidos por otros autores (Boström, 1994, Chrestin & Boström, 1997), quienes estudiaron la resistencia a flexión de la madera de siete aserraderos en Suecia. La razón principal por la que la relación entre la resistencia y el MOE puede variar de un aserradero a otro es la presencia de nudos, y que el tamaño de los nudos varía. La madera del aserradero “I” tenía un ratio de área de nudo que era solo el 70% del de la madera de “L”.

Tabla 1.4. Relación entre la resistencia y el MOE de 40x145 mm en píceas noruegas expresado como coeficiente de determinación (R^2).

Fuente	Tracción		Flexión	
	N	R^2	N	R^2
E	149	0,65	50	0,73
G	150	0,70		
H	150	0,62		
I	149	0,51	50	0,60
K	152	0,69	50	0,54
L	153	0,68		
M	139	0,66		
S	154	0,63	56	0,63

La temperatura de secado puede afectar a la relación entre la resistencia a flexión y el MOE. En ensayos sobre madera píceas noruegas secadas a temperaturas bajas y altas (115-120°C) se pudo comprobar que el MOE en vigas ensayadas de canto no se vio afectado, pero la resistencia a flexión cayó un 10% en el material secado a temperaturas altas (Bengtsson, 2000).

Los nudos afectan a la rigidez de la madera debido a la modificación de la fibra de su alrededor, lo que reduce la rigidez longitudinal. Analizando la gráfica de la resistencia frente al MOE de la figura 1.13, se puede asumir que los puntos situados por encima de la línea de regresión tienen menos nudos promedio y los puntos por debajo tienen más (Hoffmeyer, 1999). La ecuación de la recta de regresión para este estudio fue $f_m = 0,0045 \text{ MOE} - 8,14$, todo en MPa.

Basándose en la relación entre el MOE y otros parámetros no destructivos, se concluyó que solo la densidad de la madera muestra una correlación razonablemente buena (Hoffmeyer, 1995). Los coeficientes de determinación que obtuvo Hoffmeyer en sus investigaciones estuvieron entre 0,25 y 0,50.

Figura 1.13. Relación entre la resistencia a flexión de canto y el módulo de elasticidad para la píceca noruega.

En la tabla 1.5 se muestran resultados experimentales de coeficientes de correlación entre el MOE y la densidad. Los números superiores de la tabla hacen referencia a las siguientes investigaciones: 1(Johansson, 1976), 2(Johansson, 1998), 3(Chrestin & Boström, 1997), 4(Boström, 1994).

Tabla 1.5. Coeficientes de correlación de varias investigaciones de la relación entre el MOE y la densidad para la madera píceca noruega (*Picea abies*).

Fuente	1		2		3		4	
	Dim. (mm)	R^2	Dim. (mm)	R^2	Dim. (mm)	R^2	Dim. (mm)	R^2
MOE	33x155	0,69	40x95	0,50				
tracción			40x145	0,44				
vs.			40x195	0,25				
densidad								
MOE			40x145	0,38	45x145	0,49	45x120	0,18
viga de							45x195	0,39
canto vs.							70x170	0,26
densidad								

Uno de los aspectos fundamentales a tener en cuenta a la hora de valorar los resultados de módulo de elasticidad es el tipo de ensayo realizado para su determinación. En España, la forma de obtener este valor se indica en la

norma de determinación de las propiedades físico-mecánicas de la madera estructural, UNE-EN 408 (AENOR, 2011a).

El valor del módulo de elasticidad es uno de los datos fundamentales para la asignación de la madera a una clase resistente según la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016), por ello es imprescindible su obtención con unos criterios conocidos para poder comparar los valores obtenidos con los de otros equipos de investigación. Esta importancia se ha puesto de manifiesto en trabajos de investigación realizados en los países Nórdicos, en los que se ha constatado que la asignación de piezas de clases de resistencia baja está influida principalmente por el valor del módulo de elasticidad, mientras que las zonas altas de clases resistentes están más determinadas por el módulo de rotura (Boström, 1999).

Inicialmente, el procedimiento para determinar el módulo de elasticidad en flexión estática según la norma UNE-EN 408 consistía en la aplicación de dos cargas centradas sobre la pieza con una distancia entre los soportes de apoyo de 18 veces la altura de la cara (h). La medición de la flecha se efectuaba en el centro del vano de aplicación de las cargas, tomando una longitud de referencia de cinco veces la altura de la cara. De esta forma se obtenía únicamente la influencia del momento flector, eliminando la influencia de la deformación por cortante.

Esta metodología de ensayo fue objeto de numerosas críticas, fundamentalmente por dar como resultado valores con escasa fiabilidad (Boström, 1999). Las críticas se basaban fundamentalmente en la falta de concreción de la norma a la hora de especificar las condiciones de ensayo, en concreto la norma no indicaba el lugar (la altura de la cara de la viga) dónde se debía situar el medidor del desplazamiento (en la parte traccionada, en la comprimida o en el centro). En función de la posición del medidor, se obtienen valores diferentes del módulo de elasticidad. En la parte comprimida se obtienen menores desplazamientos y, por tanto, módulos de elasticidad más altos (Boström, 1999).

Tampoco se especificaba si la medición se debía realizar en una cara o en las dos. Esta cuestión también influye en los resultados obtenidos (Boström,

1999). Otro punto conflictivo se debía a que la medida del desplazamiento se realizaba sobre una distancia muy corta ($5xh$), por lo que los desplazamientos que se miden son muy pequeños y la sensibilidad de los aparatos de medida juega un papel muy importante en la bondad de los resultados obtenidos (Bostroöm, 1999).

En Norte América y Australia el procedimiento empleado para obtener el módulo de elasticidad es distinto. En USA y Canadá se emplean normas ASTM midiendo la deformación sobre la fibra neutra de la pieza, en una relación luz-altura de cara de $17xh$ a $21xh$, la misma distancia que los apoyos, situando el peor defecto en todo el vano, no teniendo que estar necesariamente centrado. En Australia y Nueva Zelanda los ensayos se realizan de la misma manera pero la medida del desplazamiento, se realiza en la cara traccionada del centro de la viga.

Al cálculo del módulo de elasticidad evaluado con este procedimiento se le denomina Módulo de Elasticidad Global (MOEG) y al método de medida del desplazamiento sólo en el tercio central, se le conoce como Módulo de Elasticidad Local (MOE). El valor del módulo de elasticidad está muy influenciado por el procedimiento de análisis y se ha comprobado experimentalmente que el módulo de elasticidad local suele ser mayor que el módulo de elasticidad global. Esta diferencia se debe a que el módulo de elasticidad global incluye la deformación debida al esfuerzo cortante. Además, la influencia de los defectos existentes en las vigas ensayadas es mayor en la evaluación del MOEG que en el MOE.

El MOEG presenta frente al MOE las ventajas de la sencillez de realización y el reproducir de una forma más verosímil las condiciones reales de uso.

Por todos estos motivos, se revisó la norma UNE-EN 408 (AENOR, 1996a), introduciendo el ensayo de módulo de elasticidad en flexión global (MOEG), además de mantener el ya existente de módulo de elasticidad local.

Las especificaciones para la realización del ensayo del MOEG según la norma UNE-EN 408 (AENOR, 1996a) consistían en tomar la medida en una distancia de $18xh$ del desplazamiento producido por dos cargas simétricas aplicadas en el tercio central de la pieza, sobre la fibra neutra de la pieza,

situando el medidor en el centro de la luz entre los dos apoyos. El módulo de elasticidad resultante debía considerarse como el valor medio obtenido de evaluar el desplazamiento sobre las dos caras de la pieza.

La última especificación de la norma europea UNE-EN 408 (AENOR, 2004), introduce la posibilidad de realizar el ensayo del módulo de elasticidad global con el medidor situado en el centro, sobre el canto de la pieza (zona traccionada). Esta forma de ensayo es más cómoda y rápida para obtener el módulo de elasticidad global, ya que se elimina el empleo de reglas que deban sujetar el captador para tomar la medida sobre la fibra neutra. A este nuevo ensayo del módulo de elasticidad global, que toma la medida en el canto de la pieza, se le denomina Módulo de Elasticidad Global de Canto (MOEGCTO).

1.2.3.5 Combinación de Parámetros No destructivos

En los puntos anteriores se ha estudiado como se relacionan determinados parámetros individuales con las propiedades de resistencia y rigidez. Mediante la combinación de dos o más parámetros la predicción puede ser mejorada. Hoffmeyer (Hoffmeyer, 1995) usó múltiples análisis de regresión y obtuvo los siguientes resultados:

- Resistencia a flexión frente a nudos, ancho anual del anillo y densidad: $R^2 = 0,4$.
- Resistencia a tracción frente a nudos, ancho anual del anillo y densidad: $R^2 = 0,5$.

Combinando información sobre nudos y ancho anual del anillo así como combinando nudos y densidad se obtiene una correlación considerablemente mejor que cuando los parámetros se usan individualmente. A las mismas conclusiones llegaron Hoffmeyer, Bräuner, Boström y Solli (Hoffmeyer, 1999). Para la resistencia a flexión, los nudos estrechos contienen la mayoría de la información del nudo, y que añadiendo datos de nudos amplios y nudos agrupados solo aumentan los valores de R^2 minoritariamente.

El módulo de elasticidad por si solo da una mejor predicción que la densidad, ancho anual del anillo y datos del nudo combinados (Hoffmeyer,

1995). Esto es, debido al hecho de que el MOE para la madera también contiene información de las propiedades de la madera sin defectos (densidad/ancho anual del anillo), nudos, inclinación de la fibra y posiblemente también otras características.

Johansson (Johansson et al., 1992) y Boström (Boström, 1994) comprobaron que para la flexión en vigas ensayadas de canto es suficiente añadir datos del exterior del nudo al MOE para mejorar la correlación. Otros datos del nudo parecen ser redundantes.

1.2.3.6 Deformación y fluencia

Una de las características que distinguen más a la madera respecto a otros materiales estructurales es su módulo de elasticidad relativamente bajo. Su baja rigidez, junto con valores de resistencia relativamente altos, origina deformaciones considerables en las estructuras de madera. Por este motivo es frecuente encontrar forjados antiguos con viguetas de madera, que a pesar de tener grandes flechas, no parece encontrarse en peligro su capacidad portante.

Junto a las deformaciones hay que considerar que la baja rigidez penaliza también el fenómeno del pandeo. Para estudiar con detalle el pandeo de pilares y el vuelco lateral de vigas se utilizan procedimientos similares a los empleados en otros materiales. En la práctica estos procedimientos se simplifican aplicando coeficientes determinados en función de la esbeltez de la pieza y que disminuyen los valores de cálculo de la resistencia de la madera.

Otro efecto a considerar al hablar de las deformaciones en las estructuras de madera es el de fluencia. Una estructura de madera, al igual que con cualquier otro material, al entrar en carga sufre una deformación inicial que puede calcularse empleando la teoría clásica de resistencia de materiales. Esta deformación, bajo carga constante, crece paulatinamente según pasa el tiempo. Se trata de una deformación diferida que puede llegar a manifestarse al cabo de los años pudiendo alcanzar, en función de las circunstancias, de dos a tres veces el valor de la deformación inicial. A este fenómeno se le conoce como fluencia.

Por otro lado, las deformaciones presentes en estructuras existentes pueden aportar información valiosa y pueden servir de base para la caracterización y peritación de sistemas estructurales (Herrero, 2003).

La resistencia depende de la duración de la carga para todos los materiales estructurales, este fenómeno se conoce como cansancio. Esto es de poca importancia en la práctica para la mayoría de los materiales, pero para la madera la pérdida de resistencia bajo cargas permanentes es tan grande que tiene que ser considerada en su diseño. Los valores de resistencia de cálculo se minoran con un factor de reducción, dependiendo de la duración de carga estimada y de la humedad. Para madera maciza, la reducción de la resistencia en diez años de duración de la carga, puede llegar a alcanzar el 40%.

Los mecanismos que se esconden acerca de los efectos de la duración de la carga en la resistencia de la madera no están totalmente comprendidos todavía, a pesar de que se han llevado a cabo una gran cantidad de investigaciones. Hay varias circunstancias que hacen que las investigaciones sobre los efectos de la duración de la carga sean complicadas y costosas. Si realmente se quiere conocer la relevancia del factor duración de la carga, las investigaciones experimentales se alargan demasiado en el tiempo. La cuantificación de estos efectos implica una comparación entre la resistencia de especímenes bajo cargas a largo plazo y ensayos estándar de corto plazo. Estos dos ensayos tienen que ser realizados en dos grupos diferentes de muestras, mientras que la misma pieza de madera no puede romperse dos veces. La gran variabilidad de la madera, especialmente para madera maciza, hace incierta cualquier observación del efecto relativo de la duración de la carga.

1.2.3.7 Estabilidad al fuego

A diferencia de lo que ocurre con otros materiales estructurales no ignífugos, la madera es un material que arde a temperaturas relativamente bajas. Según esta característica, denominada como Reacción al Fuego, la madera se clasifica en general como material M3, según la Norma UNE 23727 (AENOR, 1990).

Dada la singularidad de uso de las piezas que son objeto de este estudio, en general no parece necesario profundizar en el análisis del comportamiento ante el fuego de sistemas destinados a PC o MAE, ya que la situación de alarma en caso de incendio eliminaría, casi por completo las exigencias funcionales de estos elementos. En algunos casos particulares como el de apuntalamientos generalizados de edificios con elementos estructurales de madera, la consideración del comportamiento ante incendio de los elementos estudiados en este trabajo puede tener más importancia.

Desde cualquier punto de vista cabría tener en cuenta el incremento de la carga de fuego que suponen estos elementos en el conjunto de la construcción siniestrada y por otro lado cabe destacar la consideración de que ante una estructura de madera sometida a un incendio, la única consecuencia que tiene lugar es que la madera pierde sección resistente por las superficies expuestas al fuego mientras en el interior se conserva la temperatura inicial, por lo que las propiedades mecánicas de la madera no se ven alteradas y la sección residual sigue cumpliendo satisfactoriamente sus funciones resistentes.

Así, a los efectos de determinar el tiempo útil, ante un incendio, de unas piezas de madera que forman parte de PC o MAE, debe fundamentarse en el hecho de que una pieza de madera de pequeña escuadría tiene poca sección que perder, por lo que en pocos minutos se habrá consumido la mayor parte de la sección y se colapsará la estructura. En una primera aproximación, puede estimarse que la pérdida de sección en la madera se produce a razón de unos 0,8 mm por minuto, por lo que al cabo de 30 minutos, una pieza expuesta a un incendio habrá perdido unos 24 mm de sección por cada cara expuesta. Este orden de magnitud permite hacer una primera estimación de la estabilidad al fuego de cualquier sistema de PC o MAE para comprobar que su eficacia en situación de incendio desaparecería en pocos minutos, en el supuesto caso de verse sometida a fuego directo.

1.2.3.8 Durabilidad

La madera es un material de origen orgánico por lo que la interacción con los elementos del medio que la rodean supone unas consecuencias que no se pueden desestimar. En algunos casos estas consecuencias son beneficiosas pero en la mayoría de las ocasiones son perjudiciales.

En general, cuando la interacción con el medio se reduce al mínimo y además se toman las precauciones adecuadas, la durabilidad de la madera es muy alta.

Los agentes que comprometen la durabilidad de la madera se pueden clasificar en dos tipos: agentes abióticos (no vivos) y agentes bióticos (vivos).

Los principales agentes abióticos son la fotodegradación debida a la radiación ultravioleta de la luz solar, el lavado o erosión por arrastre físico de partículas transportadas por el agua de lluvia o el viento y el desgaste por el uso. Todos estos agentes tienen una influencia muy pequeña sobre la madera estructural cuando ésta se encuentra convenientemente protegida. Sin embargo cuando la madera carece de protección, como es usual en PC o MAE, la influencia puede ser muy importante.

Los agentes bióticos reducen la durabilidad de la madera y afectan a sus propiedades mecánicas de una forma más agresiva que los agentes abióticos. Entre estos agentes se encuentran los hongos y los insectos xilófagos. En la mayoría de las ocasiones, para que estos ataques se produzcan se requieren unas determinadas condiciones de temperatura y de humedad.

1.2.3.9 Madera estructural

Las propiedades de la madera como material se han estudiado a partir del ensayo de pequeñas muestras de madera limpia y sin defectos en las cuales se han evaluado propiedades físicas, como la densidad, o mecánicas como resistencias y rigideces.

Sin embargo, la madera que se emplea con finalidad estructural difiere enormemente de la madera ensayada en estas pequeñas muestras sin

defectos. La madera estructural posee nudos, fendas, desviaciones de fibras y otras particularidades que hacen que su comportamiento mecánico pueda diferir de forma notable del estimado a partir de las pequeñas muestras sin defectos. Como orden de magnitud, se puede estimar que una viga de madera de pino silvestre con nudos en sus fibras traccionadas puede tener una resistencia a flexión del orden de diez veces menor que la que se obtendría con una probeta libre de defectos.

1.2.3.10 Especies

Bajo diferentes denominaciones se pueden encontrar unas cuantas especies con las que se construyen la gran mayoría de las estructuras de madera. A continuación, simplificando la nomenclatura, se indican las más habituales.

Las especies nacionales más utilizadas son el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), el pino laricio (*Pinus nigra* Arnold), el pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.), pino radiata o pino insigne (*Pinus radiata* D. Dom.), el castaño (*Castanea* sp.) y el roble (*Quercus robur* L. o *Quercus petraea* Liebl.). De estas especies sólo las cuatro primeras se pueden clasificar para uso estructural conforme a la norma española UNE 56544 (AENOR, 2011b).

Otras maderas procedentes de otros países son el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), la picea o abeto rojo (*Picea abies* (L.) Karst), el roble (*Quercus robur* L.), el pino amarillo del sur o southern yellow pine (esta denominación agrupa a unas cuantas especies de pino procedentes del sur de Estados Unidos) y el pino oregón o abeto douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco).

Como se puede comprobar, la mayoría de estas especies son coníferas. La relativa proximidad entre las propiedades de las coníferas utilizadas en España, dentro de calidades medias, y el hecho constatado de la costumbre en el uso de estas especies en el ámbito de las PC y MAE, apoyan por necesidad la decisión de limitar el estudio a la madera de coníferas en general y a la de pino silvestre de manera particular.

No obstante, el estudio de otras especies no es menos interesante y se perfila como una de las líneas posibles para la continuidad de estas investigaciones.

1.2.4 Descripción y características de la especie Pino Silvestre

Esta especie se conoce con nombres distintos en función de la zona de la Península Ibérica en la cual se encuentre. Se denomina como pino blanquillo y pino de Valsaín en la Sierra de Guadarrama (Sistema Central) (figura 1.14); pino serrano en la Sierra de Gredos; pino albar en Soria, Burgos, Cuenca, Sierra de Baza, Sierra de Guadarrama occidental, etc.; pino rojal en Levante, Aragón y Cataluña; pi blancal, pi bord, pi roig en Cataluña; pino royo en el Pirineo de Huesca; y pino lerr en el País Vasco. Vulgarmente se le conoce también como pino cortezuelo o cortezudo, rojo y bermejo (Rojo & Montero, 1996).

Figura 1.14. Pinar adulto de pino silvestre en la Sierra de Guadarrama, San Rafael, Segovia.

Internacionalmente, se le denomina Scotch pine en inglés, Pin silvestre en francés, Gemeine Kiefer en alemán y Pino silvestre en italiano y comercialmente pino de Escocia, pino de Riga, pino del Báltico, pino de Valsaín (nombre empleado para todas las procedencias españolas), pino Nórdico, pino Suecia, etc.

El árbol alcanza una altura de entre 35 y 40 metros. El fuste es de porte derecho, cilíndrico y recto, El diámetro del tronco del árbol suele ser superior a 1 m. Puede llegar a los 500-600 años de edad (Ruiz de la Torre & Ceballos, 1979). Cuando crece en bosques espesos, su ramificación es muy escasa y se reduce únicamente al tercio superior (figura 1.15). Si crece de forma aislada, presenta gran abundancia de ramas gruesas.

Figura 1.15. Ramificación en tercio superior del pino blanquillo o pino Valsain en la Sierra de Guadarrama, San Rafael, Segovia.

Se trata de una especie de crecimiento rápido alcanzando, a los 120 años, el fuste los 30 metros en localizaciones favorables y no más de 20 metros en situaciones menos favorables. El crecimiento en altura se retarda a los 40 años y se para hacia los 100-120 años, alcanzándose diámetros entre 35-50 centímetros, lo que permite establecer una pauta para los turnos de producción (Vignote, 2014).

La madera de esta especie es compacta y resinosa, el duramen es rojizo y la albura es de color blanco-amarillento (figura 1.16).

Figura 1.16. Sección transversal de madera de *Pinus sylvestris* .

La producción de madera de pino silvestre se suele mantener próxima al millón de m³, excepto en los años 2009 y 2010 donde se produjo una bajada. En el año 2013 fue de 976.441 m³ (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio ambiente, 2013), cantidad superior a la de los años anteriores. Presenta el problema de que el 16% de la superficie poblada se encuentra por encima de los 1.600 metros de altitud, cota a partir de la cual presenta problemas de regeneración ocasionando un descenso en la producción de madera.

La madera de pino silvestre, junto con la de pino laricio, se ha considerado tradicionalmente desde hace decenios como una de las mejores maderas existentes en España, por su calidad, limpieza y rectitud de los fustes. Se utiliza en aplicaciones muy variadas, principalmente para carpintería, construcción, ebanistería y serrería. La resina puede dificultar el mecanizado de la madera.

Seca rápido al aire, sin deteriorar su calidad aunque con tendencia marcada al azulado. Riesgo que se puede reducir si se realiza el secado artificialmente.

Es una madera muy utilizada en España en el ámbito de la edificación, como madera estructural y como material componente de PC y MAE.

1.3 Normativa

Como consecuencia de la implantación del Mercado Único Europeo a principios de los noventa, comenzó el libre comercio de los productos en los países asociados al Mercado Único Europeo. Se observa que la heterogeneidad en el comportamiento de la madera en función del lugar de procedencia, constituye un obstáculo muy grave para su comercialización en distintos países.

Para mitigar estos inconvenientes, apareció una corriente normalizadora para la madera dentro de la Unión Europea, similar a la creada con otros materiales y sistemas, para establecer una pauta común de comportamiento.

El Comité europeo dedicado a la normalización de aspectos relativos a la madera aserrada de uso estructural es el CEN/TC 124. En este comité se tratan, la normalización de las dimensiones preferentes y tolerancias (AENOR, 2014), las clases resistentes (AENOR, 2010a), el método de cálculo de los valores característicos (AENOR, 2010b), los métodos de ensayo de las propiedades mecánicas y físicas (AENOR, 2010a) y los requisitos necesarios para la clasificación visual o por máquina (AENOR, 2006). Por tanto, en este Comité se incluye la norma que especifica el procedimiento para realizar los ensayos (AENOR, 2011a) de forma que se obtengan valores que permitan compararlos con los de otros países o procedencias.

A nivel de proyecto y dimensionamiento de estructuras de madera, el *Eurocódigo 5* (The European Union Per Regulation, 2004) se encarga del diseño y cálculo de estructuras de madera.

1.3.1 Asignación de clases de calidad a clases resistentes

Un requisito imprescindible para poder emplear la madera en funciones estructurales es conocer con el grado de exactitud necesario sus propiedades

de resistencia y rigidez. A diferencia de lo que ocurre con otros materiales estructurales como el hormigón o el acero, las propiedades mecánicas de la madera poseen una gran variabilidad dentro de la misma especie e incluso con la misma calidad aparente. La clasificación de la madera permite obtener herramientas para poder determinar sus propiedades mecánicas. Existen dos sistemas de clasificación de la madera:

- *Clasificación visual.* Se basa en la inspección visual de piezas de madera y la medición de una serie de defectos apreciables a la vista y su comparación con unos límites especificados.
- *Clasificación mecánica.* Se basa en el paso de las piezas por una máquina que mide uno o varios parámetros de forma no destructiva para predecir la resistencia y su rigidez.

A principios del siglo veinte se establecieron las reglas formales de clasificación visual de la madera. En USA, ASTM Standard D245, publicó en 1927 las líneas generales para desarrollar reglas de clasificación (Madsen, 1992). Desde los años 30 en adelante, las reglas de clasificación se han ido introduciendo en varios países europeos (Glos, 1995). Las reglas de clasificación desarrolladas durante los últimos 60 años difieren ampliamente con respecto a los criterios de clasificación, número de clasificaciones y límites de clasificación. Esto es debido al gran número de especies de madera, calidad de la madera y tradiciones de construcción. Todas las reglas de clasificación visuales tienen en común la deficiencia general que, por razones prácticas, solo las características visuales reconocibles pueden ser tomadas en consideración, y solo puede realizarse de forma operativa una combinación sencilla de reglas.

La idea de usar mediciones no destructivas para predecir la resistencia y usar los datos obtenidos como base para la clasificación de la madera fue propuesto simultáneamente en USA y Australia a finales de los 50 (Madsen, 1992). El principal objetivo buscado fue mejorar la precisión de los procedimientos de clasificación con el fin de valorar mejor las propiedades mecánicas.

La clasificación de la madera incluye la valoración de propiedades físicas como la densidad y propiedades mecánicas como la resistencia y la rigidez. La densidad es una propiedad muy importante porque la resistencia de las uniones mecánicas en la madera está relacionada con la densidad.

Para favorecer el libre comercio de la madera estructural en la Unión Europea, se ha creado un sistema de clases resistentes, utilizando como precedentes las experiencias en países Reino Unido y Australia. Este sistema es compatible con la utilización de las normas nacionales de clasificación ya definidas en cada país.

El primer sistema de clases resistentes que se aplicó en Europa apareció en Reino Unido y data de comienzos de los años 80. El objetivo básico de este sistema consiste en definir una serie de clases de resistencia en función de unos valores mínimos de resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad. A cada clase resistente se le asignan aquellas combinaciones especie-calidad-norma cuyas propiedades mecánicas sean al menos iguales a las descritas como mínimas para cada clase de resistencia.

Este sistema presenta la ventaja de que el diseñador puede realizar los cálculos resistentes con unas propiedades mecánicas de un valor “seguro”.

Un sistema de clases resistentes consiste en la definición de un número discreto de clases, para cada una de las cuales, se indican los valores característicos de las propiedades resistentes, elásticas y de densidad. En España, la norma que establece y describe las clases resistentes es la UNE-EN 338 (AENOR, 2016).

La asignación de las combinaciones especie-calidad-norma a las clases resistentes de la norma UNE-EN 338 se lleva a cabo mediante la identificación y clasificación previa del material, para lo cual es necesario hacer uso de normas o sistemas de clasificación que cumplan con los criterios generales establecidos en la norma EN 14081, equivalente a la norma UNE-EN 14081 (AENOR, 2006).

La forma más sencilla y menos costosa para la clasificación de la madera es una clasificación visual, que se basa en la inspección y valoración de las

singularidades presentes de la madera y en su asignación al sistema de clases de calidad. Existen procedimientos mecánicos, más eficaces y costosos que pueden clasificar directamente por clases resistentes en vez de por clases de calidad.

Además de la aplicación de la UNE-EN 338 (AENOR, 2016) y el sistema de clases resistentes, es necesario utilizar las siguientes normas:

- UNE-EN 408 (AENOR, 2011a). En esta norma se establecen los criterios generales para poder realizar el muestreo y los ensayos.
- UNE-EN 384 (AENOR, 2010b). Esta norma especifica la forma de calcular los valores de resistencia, rigidez y densidad de la madera.
- Las normas nacionales de clasificación visual, UNE 56544 (AENOR, 2011b) en España, o la norma de clasificación resistente mecánica, EN 14081-4 (AENOR, 2009) de la madera.
- UNE-EN 1912 (AENOR, 2012). Esta norma interrelaciona las combinaciones especie-calidad-norma con las clases de resistencia.

La norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016) distingue entre clases resistentes de madera de coníferas y de frondosas. La razón de esta distinción estriba en la diferencia entre las estructuras anatómicas de ambos tipos de madera, lo que implica que su comportamiento también sea distinto. A modo de ejemplo, la densidad de la madera de frondosas es alta pero no se corresponde con sus propiedades resistentes y de rigidez como cabría esperar. El chopo es la única especie de madera frondosa que tiene relaciones densidad-resistencia similares a las de las coníferas y por tanto se le aplican las mismas clases resistentes que a éstas.

La denominación de las clases resistentes incluye un número que indica el valor mínimo de la resistencia a la flexión de esa clase, en N/mm^2 y una letra que hace referencia al género del que se trate, C: Coníferas, D: Frondosas (Deciduous).

Actualmente se han definido doce clases resistentes para coníferas y chopos, desde la C14 hasta la C50. Las frondosas tienen una aplicación para

fines estructurales muy inferior a las coníferas por lo que las clases resistentes definidas para maderas de frondosas son sólo seis, desde la D30 hasta la D70.

La norma indica que una población de madera puede ser asignada a una clase resistente cuando los valores característicos calculados para la resistencia y la densidad son iguales o mayores a los valores de dicha clase aportados por la norma, y el valor medio del módulo de elasticidad iguala o excede el 95% del valor de dicha clase. Por tanto para la asignación especie-calidad de una población a una clase es suficiente el cálculo de estas tres propiedades. Una vez determinada la clase resistente de pertenencia de la población, los valores del resto de las características físicas y mecánicas pueden determinarse mediante el uso de expresiones y tablas de la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016). La norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016) aporta las propiedades resistentes (flexión, tracción paralela y perpendicular, compresión paralela y perpendicular y cortante) en N/mm^2 , las propiedades elásticas (módulo de elasticidad medio paralelo y perpendicular, módulo de elasticidad al 5% y módulo del cortante medio) en kN/mm^2 y los valores de la densidad (densidad característica y densidad media) en kg/m^3 .

Si la clasificación se realiza mediante máquina automatizada, la asignación puede realizarse directamente por los valores de rigidez determinados por ella, habiendo previamente establecido las relaciones entre ésta y la resistencia y los parámetros de paso para la máquina entre clases resistentes, según el proyecto de norma EN 14081-2 (AENOR, 2010a).

1.3.2 Estado actual y revisión de la técnica de clasificación no destructiva de la madera

Las propiedades mecánicas de la madera poseen una variabilidad muy superior a la de otros materiales de construcción. Es habitual obtener coeficientes de variación de hasta el 40 %. Dentro de una misma especie existen multitud de factores que afectan a las propiedades mecánicas como pueden ser la zona de procedencia de la madera o las diferencias de origen genético entre árboles del mismo lugar (J. Fernández-Golfín, 1998). El

proceso de transformación posterior de la madera añade de nuevo factores que contribuyen a una mayor variabilidad como pueden ser el tipo de aserrado o de secado.

Debido a estos motivos, es necesario contar con criterios normalizados que garanticen la homogeneidad necesaria a los lotes comerciales de madera para poder garantizar su uso estructural. Con este propósito han aparecido los métodos de clasificación de la madera.

Los métodos de clasificación emplean procedimientos no destructivos que asignan propiedades mecánicas a las piezas de madera. Es preciso una labor de investigación continua que garantice, a partir de la ejecución de ensayos mecánicos, que las propiedades estimadas mediante los métodos de clasificación se ajustan a las propiedades reales de las piezas ensayadas.

Actualmente existen dos métodos para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera aprobados por la normativa y basados en técnicas de clasificación no destructivas: la clasificación visual y la clasificación mecánica.

1.3.3 Clasificación mediante métodos visuales

El primer procedimiento de clasificación no destructiva de la madera mediante métodos visuales data del año 1923 y fue publicado por el Forest Products Laboratory (USA). Actualmente la clasificación mediante métodos visuales es un procedimiento muy utilizado, ampliamente investigado y sujeto a continuas revisiones en la normativa internacional.

El procedimiento se basa en que se sabe que determinadas singularidades y defectos de la madera influyen de una determinada forma en sus propiedades mecánicas. Si se pudiese cuantificar el modo en el que influyen, sería posible asignar propiedades mecánicas a piezas estructurales de madera en función de la especie de que se trata y de las singularidades existentes en las piezas a valorar.

Es un procedimiento de muy fácil aplicación y, como suele suceder en todos los procedimientos de fácil aplicación en ingeniería, da resultados que quedan muy del lado de la seguridad.

1.3.3.1 Indicadores de calidad en la clasificación visual

Los indicadores de calidad que se emplean en la clasificación visual de la madera son las singularidades presentes en la misma (AENOR, 2000a). No todas las singularidades tienen la misma importancia ni tampoco afectan a las mismas propiedades mecánicas.

Existe consenso internacional a la hora de considerar a los nudos como la singularidad más importante debido a su influencia sobre la resistencia de la madera, sobre todo cuando se localizan en las fibras traccionadas. Además de la pérdida de sección resistente, la presencia de nudos produce una desviación de las fibras adyacentes lo que provoca concentración de tensiones que dan lugar a bajadas de resistencia en los elementos estructurales.

La desviación general de las fibras provoca concentraciones de tensiones que, como se ha apuntado en el párrafo anterior, dan lugar a disminuciones de la resistencia.

Otras singularidades que afectan a las propiedades mecánicas de la madera son las acebolladuras (separaciones longitudinales entre anillos de crecimiento), los entrecascos (inclusiones de corteza entre las fibras), bolsas de resina (acumulación de resina entre las fibras), alabeos, curvaturas, alejados, gemas, ataques biológicos y presencia de médula y madera de reacción.

El anillo de crecimiento ha sido considerado como indicador de calidad por la anterior norma UNE-EN 518 (AENOR, 1996b) y la más reciente UNE-EN 14081-1 (AENOR, 2006). Sin embargo, trabajos de investigación realizados en el INIA sobre diversas especies de pino (J. Fernández-Golfín, 1998) han demostrado que la anchura media del anillo evaluada en los términos de la norma UNE-EN 1310 (AENOR, 1997), no tiene una influencia significativa en las propiedades de resistencia y rigidez de la madera. También se pudo comprobar que la anchura media máxima, evaluada en los términos de la norma UNE 56544 (AENOR, 2011b), tiene influencia en la deformación durante el secado.

1.3.4 Norma marco EN 14081-1, referencia de las normas visuales

La norma marco inicial donde se especificaban todos los criterios de calidad para la clasificación mecánica de la madera estructural fue la EN 518 "Structural timber. Grading. Requirements for visual strength grading standards"(AENOR, 1996b). Esta norma se integró posteriormente en la Parte 1 de la norma EN 14081 "Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section . Part 1: General Requirements", en la que se establecen unas bases comunes que sirven de referencia a las normas nacionales. En España, la norma de clasificación visual se denomina UNE 56544 y tiene como referencia la norma EN 14081-1 (que sustituye a la antigua EN 518).

La norma EN 14081-1 indica las singularidades que deben medirse en los procedimientos nacionales de clasificación visual para madera aserrada de uso estructural. Estas singularidades pueden ser de tres tipos:

- Singularidades reductoras de la resistencia: Nudos, desviación de la fibra, densidad y espesor de anillo, fendas.
- Singularidades geométricas: Gemas y deformaciones (alabeo, curvado y atejado).
- Daños de origen biológico: Hongos y insectos.
- Otras características: Maderas de reacción y daños mecánicos.

La norma de clasificación visual española UNE 56544 cumple con todos los requisitos especificados por la norma europea de referencia (EN 14081) e incorpora otras limitaciones.

1.3.5 Medición de las singularidades de la madera

A continuación se indica el modo de realizar la medición de singularidades para la correcta clasificación visual de la madera.

1.3.5.1 Medición de nudos

Se considera como tamaño del nudo la anchura del nudo o del grupo de nudos, medidos perpendicularmente al eje longitudinal de la pieza diferenciando siempre si su presencia es en cara o en canto (figuras 1.17, 1.18 y 1.19).

Figura 1.17. Medición de los diferentes tipos de nudo (1: nudos de cara, 2: nudos de canto).

Figura 1.18. Medición de nudos de cara.

Figura 1.19. Medición de nudos de canto.

Los nudos con diámetros inferior o igual a 10 mm pueden despreciarse, excepto en los nudos pasantes, aquellos que se manifiestan al menos en dos superficies opuestas.

Los nudos superficiales de la cara interna (cara que se encuentra más cerca de la médula) se despreciarán, teniéndolos en cuenta exclusivamente si aparecen en la arista o en el canto (figuras 1.20 y 1.21).

Figura 1.20. Nudos de cara interna despreciables.

Figura 1.21. Nudo de cara interna no despreciables, en este caso se mide el nudo en el canto.

Los nudos que se manifiesten cortados oblicuamente o transversalmente, se considerarán únicamente en aquella superficie que los corte más perpendicularmente (figura 1.22). En caso de duda se medirá el nudo en la cara que resulte más desfavorable, siendo esta la que mayor relación tamaño nudo/tamaño de la cara.

Figura 1.22. Medición de nudos cortados oblicuamente o transversalmente con salida perpendicular en cara (imagen izquierda) o canto (imagen derecha).

Se denominan nudos agrupados (figura 1.23) al grupo de nudos que se encuentran a una distancia en el sentido longitudinal de la pieza menor de la

longitud del canto o menor de 150 mm para piezas con un canto mayor a este (la distancia se toma desde los centros de los nudos que ocupan los extremos).

Figura 1.23. Nudos agrupados.

La medición de los nudos agrupados se realiza sumando sus dimensiones, excepto en el caso que las mismas se superpongan, tomándose como un único nudo (figura 1.24).

Figura 1.24. Medición de nudos agrupados.

En el caso de la figura 1.24. La medición de los nudos de la pieza de la izquierda se realiza sumando sus dimensiones ($d = d_1 + d_2 + d_3$). Para la pieza de la derecha, el diámetro que se considera es el marcado en la figura.

1.3.5.2 Medición de la desviación de la fibra

La medición de la desviación de la fibra se realiza trazando una línea en la dirección presumible de la fibra en caso de clasificar en húmedo o bien se toman como referencia las fendas de secado en caso de que existan en la pieza de madera. Se utiliza una regla milimétrica rígida, un calibre o bien se puede utilizar también tablillas que incorporen la pendiente máxima permitida para cada caso (figura 1.25).

Figura 1.25. Medición de la desviación de la fibra.

El cálculo, en porcentaje, de la desviación de la fibra se obtiene con la siguiente expresión [1.1]:

$$\frac{x}{y} \cdot 100 \quad [1.1]$$

Donde:

x es la desviación de la fibra, en milímetros.

y es la longitud sobre la que se ha efectuado la medida, en milímetros.

En madera de procedencia española, al ser necesario únicamente la evaluación de la desviación general, se tomará la desviación producida en 1 m de la longitud. En madera de procedencia francesa, además de la desviación

general también es necesaria la evaluación de desviaciones locales, que se medirán como las desviaciones producidas en 10 cm de longitud.

Las desviaciones locales de las fibras alrededor de los nudos o de otros defectos, no deben considerarse en la medición de la desviación de la fibra.

Se tomará como valor limitante para su clasificación la mayor desviación de la fibra detectada, tanto la general como la local en caso de ser necesario.

En el caso de clasificar madera en seco la desviación de la fibra se medirá sobre las fendas de secado que hayan aparecido, ya que es el indicador más fiable para el control de la misma.

1.3.5.3 Tasa de crecimiento

Se evalúa en función de la anchura máxima de anillo, que se determinará en el segmento recto más largo que se pueda trazar perpendicularmente a los anillos de crecimiento y que atraviesa a la pieza transversalmente.

En el caso de maderas de procedencia española, la medida comenzará en el extremo más cercano a la médula, determinándose el valor medio de la anchura de los primeros cinco anillos de crecimiento. Si la médula no estuviera presente, se medirá los cinco primeros anillos de crecimiento del lado más cercano a la médula (figura 1.26).

Figura 1.26. Medición de anchura máxima de los anillos de crecimiento para madera de procedencia española, en testas con presencia de médula y con ausencia de la misma.

1.3.5.4 Fendas

Las fendas cuya anchura no supere 1 mm se desprecian. Las fendas se pueden medir a través de su longitud, siendo está la distancia entre dos líneas perpendiculares al eje longitudinal de la pieza que pasen por los extremos de la fenda (figura 1.26). Cuando se trate de fendas agrupadas, se mide la longitud total del agrupamiento. Si existen varias fendas, o grupo de fendas, se suman sus longitudes. El resultado se expresa en centímetros o en porcentaje de la longitud de la pieza.

Figura 1.27. Medición de fendas.

También se podrán medir a través de su profundidad. En el caso de fendas solapadas en la misma cara, se tomará la de mayor profundidad, en cambio si se dan en caras opuestas se evaluarán sumando las profundidades máximas de cada cara (figura 1.28).

Figura 1.28. Medición de la profundidad máxima de las fendas en caso de presentarse fendas en una sola cara (caso a) y en caras opuestas (caso b).

En el caso de la pieza de la figura 1.28 (izquierda), la profundidad máxima es f . En el caso de la pieza de la derecha, la profundidad máxima se obtiene como la suma de f_1 y f_2 .

En el caso de fendas provocadas por heladura, abatimiento, rayo y acebolladuras, solo se tendrá en cuenta su presencia.

1.3.5.5 Gemas

Cuando la gema se manifiesta en más de una zona de las aristas, se suman las diferentes longitudes, excepto cuando exista superposición longitudinal (figura 1.29).

Se mide la anchura mínima de la pieza afectada, siendo ésta la zona donde las gemas son de mayor tamaño, bien por la existencia de una gema individual o bien por la suma de dos gemas enfrentadas (h_1 en figura 1.29).

Se mide el grosor mínimo de la pieza afectada del mismo modo que la anchura mínima (b_1 o b_2 en figura 1.29).

Se toman como valores limitantes para su clasificación:

Figura 1.29. Medición de gemas.

La longitud o suma de las longitudes de todas las gemas en el caso de que no se superpongan o la longitud total en el caso de agrupamiento, y la máxima anchura detectada en cara o canto (Lg, en figura 1.29).

1.3.5.6 Entrecascos y bolsas de resinas

Se miden según su longitud, en la dirección paralela al eje de la pieza.

1.3.5.7 Deformaciones

Flecha de cara y flecha de canto

Se miden siempre sobre dos metros de longitud, utilizando una regla rígida de dos metros, aplicada contra la pieza simétricamente respecto a punto de mayor deformación, estimado visualmente. Se expresa el resultado en milímetros por cada dos metros (dimensión “x” en la figura 1.30, y dimensión “w” en la figura 1.31).

Figura 1.30. Medición de la curvatura en cara

Figura 1.31. Medición de la curvatura en canto

Atejado o abarquillado

El atejado mide o indica la deformación máxima de la anchura de la pieza. Se mide colocando una regla en aquella cara en que se observe el efecto cóncavo de la deformación (figura 1.32). El resultado se expresa en milímetros por cada 25 mm de anchura.

Figura 1.32. Medición del atejado.

Alabeo

Se mide sobre dos metros de longitud, utilizando dos rastreles colocados a dos metros, midiendo la máxima separación detectada entre los rastreles y las aristas de apoyo de la madera. El resultado se expresará en milímetros por cada dos metros de longitud (figura 1.33), convirtiendo esta cifra a posteriori en milímetros por cada 25 milímetros de anchura de la pieza.

Figura 1.33. Medición del alabeo.

1.3.5.8 Alteraciones biológicas

Solo se tienen en cuenta la presencia o ausencia de las siguientes alteraciones biológicas: muérdago (*Viscum album*), azulado, pudrición, y galerías de insectos xilófagos.

1.3.5.9 Médula

Se detectará si está o no presente en la sección de la pieza.

1.3.5.10 Madera de reacción

Su principal inconveniente radica en su anormal contracción longitudinal, que puede causar fuertes deformaciones en las piezas (caras o cantos).

Su detección es compleja, en la actualidad no existen medios visuales objetivos y fiables para detectar su presencia, salvo la propia experiencia del clasificador.

Se medirá teniendo en cuenta el rectángulo en el que el propio defecto se inscribe en la pieza.

1.3.5.11 Daños de mecanizado

Se tienen en cuenta a partir de una inspección visual detectando los posibles daños originados en el mecanizado tales como marcas de sierra, ondulado y desprendimientos de madera.

1.3.6 Asignación de clases visuales y clases resistentes

Para maderas de coníferas españolas se establecen tres clases visuales, tal y como define la UNE EN 56544 (AENOR, 2011b), dos para piezas con grosor menor o igual a 70 mm, denominadas ME-1 y ME-2 (en las que las siglas ME significan Madera Estructural) y una denominada MEG (Madera Estructural de Gran Escuadría) para piezas de grosor mayor a 70 mm. En la tabla 1.6 se indican las especificaciones para la clasificación de piezas de madera de coníferas españolas de $b \leq 70$ mm.

Tabla 1.6. Especificaciones para piezas de madera de coníferas españolas de $b \leq 70$ mm.

CRITERIOS DE CALIDAD		ME-1	ME-2
Diámetro de los nudos sobre cara (h)		$d \leq 1/5$ de "h"	$d \leq 1/2$ de "h"
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)		$d \leq 1/2$ de "b" y $d \leq 30$ mm	$d \leq 2/3$ de "b"
Anchura máxima del anillo de crecimiento (1)	VARIEDAD		
	Pino silvestre	≤ 4 mm	Sin limitación
	Pino laricio	≤ 5 mm	
	Pino gallego	≤ 8 mm	
	Pino insignie	≤ 10 mm	
Fendas		$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
	De secado (2,3)	Las fendas de secado solo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las siguientes dimensiones: $1/4$ de la longitud de la pieza y 1 metro	
	Acebolladuras, rayo, heladura y abatimiento	No permitidas	
Bolsas de resina y entrecasco		Se admiten si su longitud es menor que 1,5 "h"	
Madera de compresión		Admisible en $1/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza	Admisible en $2/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza
Desviación de la fibra		1:10 (10%)	1:6 (16.7%)
Gemas	Longitud	$\leq 1/4$ de "L"	$\leq 1/3$ de "L"
	Anchura y espesor	$g \leq 1/4$	$g \leq 1/3$
Médula (1)		Admitida No admitida si se clasifica en húmedo	Admitida
Alteraciones biológicas	Muérdago (V. album), pudrición y galerías de insectos xilófagos	No se admiten	
	Azulado	Se admiten	
Deformación/es máximas (2,4)	Curvatura de cara	10 mm (2m de longitud)	20 mm (2 m de longitud)
	Curvatura de canto	8 mm (para 2 m de longitud)	12 mm (2 m de longitud)
	Alabeo	1 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2m) es decir $\leq "h"/25$	2 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2m) es decir $\leq 2"h"/25$)
	Atejado o abarquillado	Sin limitación	Sin limitación

1. Estos criterios solo se consideran cuando se comercializa en húmedo.
2. Estas características no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.
3. Referidas a un 20% de humedad.
4. Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (que puedan corregirse durante la fase de montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre suministrador y cliente.

En base a la clasificación visual realizada sobre una determinada pieza (ME-1, ME-2, MEG), su asignación a una clase resistente según la especie de que se trate se realiza según la tabla 1.7.

Tabla 1.7. Clases resistentes por especie y clases visuales para coníferas españolas.

Especie	Clase de calidad		
	ME-1	ME-2	MEG
Pino silvestre	C27	C18	C22

Tabla 1.8. Valores característicos en función de la clase resistente.

Valores Característicos		Clase resistente (conífera)											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela	$f_{t, 0, k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracción perpendicular	$f_{t, 90, k}$	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	$f_{c, 0, k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compresión perpendicular	$f_{c, 90, k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Cortante	$f_{v, k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
MOE paralelo medio	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
MOE paralelo 5º percentil	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
MOE perpendicular medio	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,37	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
MOE transversal medio	G_{mean}	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidad media	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

En la tabla 1.8 se ofrecen los valores característicos asignados por la norma EN 338 para las clases resistentes de madera de conífera.

1.4 Ensayos no destructivos

Debido a que los ensayos mecánicos realizados sobre las piezas de madera son costosos en tiempo y en dinero, las técnicas no destructivas (TND) o ensayos no destructivos (END) han adquirido un gran auge (Wangaard, 1950). Se pueden definir como técnicas que permiten identificar propiedades físicas y mecánicas de los materiales sin alterar su capacidad de aplicación (Ross et al., 1998).

Los END se han empleado desde hace decenios de forma generalizada para predecir las propiedades mecánicas de la madera.

1.4.1 La resistografía

La resistografía es una técnica pseudo no destructiva que se basa en un equipo que taladra la madera con una broca fina (diámetro de 1,5 mm en el fuste y 3 mm en la punta) que avanza a velocidad constante hasta una profundidad de 100 cm. A medida que se produce el taladro, se registra mediante un potenciómetro la resistencia al avance de la broca. La resistencia se relaciona con la densidad de la pieza ensayada, siendo mayor la densidad cuanto mayor es la resistencia al avance (Rinn, 2004). La cantidad de fuerza que es necesario aplicar para mantener el avance es variable según la zona que se atravesase y esas variaciones las ofrece la instrumentación asociada al resistógrafo de forma gráfica (resistograma). La integral de la curva fuerza-tiempo es la variable indicadora del ensayo (Basterra et al., 2007).

Las aplicaciones de esta técnica son muy variadas. Se ha empleado en la detección de daños internos en árboles vivos para ayudar en la toma de decisiones sobre su posible eliminación por razones de seguridad.

También se ha utilizado en la inspección de piezas de madera de estructuras antiguas, como complemento a otras técnicas no destructivas en la

inspección de pilas de puentes de madera en USA, o en la inspección de edificios históricos (Basterra et al., 2008).

El procedimiento más habitual de análisis consiste en realizar inicialmente una inspección visual de la estructura, la evaluación de los defectos de las piezas y la identificación de la especie. A continuación se utiliza la técnica del resistógrafo combinada con otros procedimientos en los lugares donde interese un conocimiento más detallado.

Una de las limitaciones principales de esta técnica es que ofrece una información muy puntual. Se ha empleado en muchas ocasiones para detectar daños producidos por organismos xilófagos u otros defectos que no serían apreciables mediante una inspección visual.

La precisión que se obtiene con este procedimiento permite apreciar diferencias de densidad entre la madera de verano y la de primavera, por lo que es posible “dibujar” un perfil de densidades de una sección de madera suficientemente preciso para muchas aplicaciones.

1.4.2 Vibraciones inducidas

La técnica se basa en la medida de la velocidad de propagación de una onda producida por un impacto. Se utiliza fundamentalmente para estimar el módulo de elasticidad y la densidad. En ocasiones también se ha utilizado para localizar daños de origen biótico en el interior de la madera, o determinar las dimensiones de piezas ocultas de madera (Beall, 2002).

1.4.3 Resistencia a la penetración (Pilodyn)

Técnica que consiste en aplicar un impacto producido por una barra circular de 2,5 mm de diámetro, que se acciona por un muelle que desarrolla una energía controlada y que se clava en la madera una profundidad. La profundidad resultante está relacionada con la densidad de la madera, por lo que es posible su estimación. No es un buen predictor de la resistencia de la madera.

1.4.4 Gamma densitometría

Permite predecir la densidad de la madera por su capacidad de absorción de una radiación cuando la atraviesa. La técnica es efectiva para estimar el estado de conservación de la madera. Cuando se complementa con una inspección visual, los resultados son más satisfactorios.

1.4.5 Fractómetro

Es un procedimiento destructivo muy poco agresivo que consiste en la realización de un ensayo mecánico de rotura por flexión en dirección radial o por compresión paralela a la fibra de una probeta cilíndrica de madera de unos 5 mm de diámetro extraída en dirección radial. Se ha utilizado para conocer la capacidad portante de troncos de árboles en pié, pero no se ha constatado su utilización en estructuras.

1.4.6 Redes neuronales

Las redes neuronales son herramientas matemáticas basadas en el análisis de múltiples variables que permiten la toma de decisiones mediante algoritmos. Se basan en observar la relación causa efecto que puede aplicarse a la predicción del comportamiento mecánico de la madera frente a los parámetros utilizados en la clasificación visual o de otro tipo. Además, la utilización de determinados algoritmos matemáticos permite reducir la distorsión que se produce en la toma de datos y en los ensayos. Se considera una opción válida para la clasificación resistente de madera estructural mediante la utilización de métodos de ensayo no destructivos (Mier, 2001).

1.4.7 Extracción de tornillos

Es un método pseudo no destructivo que consiste en introducir un tornillo en la pieza que se desea estudiar para posteriormente medir la fuerza necesaria para su arrancamiento. La interpretación de los resultados exige

disponer de las correlaciones entre las propiedades a estimar y la fuerza de extracción de tornillo (Cai et al., 2002).

1.4.8 El método de ultrasonidos

Los métodos de ultrasonido miden la velocidad de una onda que atraviesa un material desde un emisor hasta un receptor. Las frecuencias ultrasónicas que utilizan los equipos destinados a trabajar con madera son bajas, entre 20 y 500 kHz, debido a la alta atenuación que se produce en la madera (Krause, Dackermann & Li, 2015).

Los factores que afectan a la velocidad de ultrasonidos son la microestructura y macroestructura de la madera, donde el ángulo de las fibras y la longitud de los elementos anatómicos juegan un papel vital (Bucur, 1984 ; Dackermann et al., 2014). Las singularidades o defectos de la madera (Sandoz, 1989) y el grado de deterioro también afectan a la velocidad.

Esta técnica ha sido ampliamente utilizada y contrastada para determinar las constantes elásticas de la madera (Boström, 1994; Bucur, 1984; Hernandez, Koubaa & Beaudoin, 2007; Herzig, 1992; Sandoz, 1989).

Dependiendo de la dirección en la cual se mida la velocidad de ultrasonidos (longitudinal, transversal o radial) se obtienen distintas velocidades. Las velocidades en dirección longitudinal son mayores, situándose en el rango 3050 a 6100 m/s en pequeñas muestras sin defectos con una humedad de entre el 9% y el 15% (Glos & Heimeshoff, 1982; Gerhards, 1982). Las velocidades en las direcciones tangencial y radial son menores, alrededor de la tercera parte, siendo la velocidad en la dirección radial ligeramente más alta que la velocidad en dirección tangencial (Dackermann et al., 2014). Esto se debe a que los elementos anatómicos como son las fibras están alineados en dirección longitudinal mientras que en la dirección tangencial, a lo largo de los anillos de crecimiento, no existen elementos estructurales. Además los anillos de crecimiento constituyen una barrera para la propagación de las ondas, resultando bajas velocidades (Dackermann et al., 2014).

La influencia de la densidad de la madera sobre la velocidad de ultrasonidos ha sido estudiada llegando a resultados contradictorios. Algunos investigadores han encontrado que un incremento en la densidad de la madera da lugar a menores velocidades de ultrasonidos (Bucur & Chivers, 1991), mientras que otros investigadores han obtenido la conclusión contraria (Oliveira et al., 2005). En otros casos no se ha encontrado ninguna relación entre la densidad y la velocidad de ultrasonidos (Ilic, 2003; Mishiro, 1996).

Los valores estimados para el MOE a partir de la velocidad de ultrasonidos son generalmente mayores que los obtenidos con ensayos estáticos (Oliveira et al., 2002). Se han obtenido valores de MOE mediante la técnica de ultrasonidos entre un 22% y un 32% mayores que mediante ensayos estáticos para especies de madera dura (Smulski, 1991) y entre un 19% y un 34% para maderas tropicales (Burmester, 1965). Esto se debe a que la madera es un material visco elástico y con gran capacidad de absorber impactos (Halabe et al., 1995). Por ello, la fuerza elástica restauradora es proporcional al desplazamiento y la fuerza disipativa es proporcional a la velocidad. Esto implica que cuando se aplica una fuerza durante un corto periodo de tiempo, el material muestra un comportamiento elástico, mientras que si la fuerza se mantiene en el tiempo el comportamiento se asemeja más al de un líquido viscoso. Este comportamiento se pone de manifiesto en los ensayos estáticos de flexión (carga de larga duración) frente al ensayo de ultrasonidos (corta duración) y debido a todo lo anterior el MOE obtenido por ultrasonidos es superior al obtenido en ensayos mecánicos (Oliveira et al., 2002).

2 OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este trabajo consiste en contribuir al conocimiento del comportamiento estructural de piezas de pequeña escuadría de madera de pino silvestre utilizadas en protecciones colectivas y medios auxiliares de edificación. Existen numerosos estudios acerca del comportamiento de este tipo de madera cuando se utiliza en aplicaciones estructurales, sin embargo son escasos los realizados sobre piezas de pequeña escuadría. Por otra parte el fallo de estos elementos cuando forman parte de protecciones colectivas o medios auxiliares puede tener efectos muy graves que provocan lesiones en los trabajadores, por lo que su estudio contribuye a aumentar la seguridad en las obras de construcción.

La consecución de este objetivo principal lleva implícito el alcance de los siguientes objetivos secundarios:

- Conocer el comportamiento mecánico a flexión, compresión longitudinal y compresión transversal de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría.
- Conocer el comportamiento mecánico a compresión transversal de piezas de madera de pino insignie de pequeña escuadría.
- Conocer el comportamiento mecánico a compresión longitudinal de piezas de madera de pino silvestre de gran escuadría.
- Conocer el comportamiento mecánico a flexión bajo cargas de impacto de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría.
- Comprobar experimentalmente la estimación de propiedades mecánicas mediante el sistema de clasificación resistente basado en métodos visuales.
- Comprobar experimentalmente la validez del método de ultrasonidos para poder predecir propiedades mecánicas en los tipos de piezas estudiados.

3 EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE MADERA SOMETIDOS A FLEXIÓN

3.1 Metodología. Técnicas y trabajo experimental realizado

El trabajo experimental desarrollado en este capítulo se ha realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción (LMC) de la Escuela Técnica Superior de Edificación (ETSE) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Los materiales y equipos utilizados se describen a continuación.

3.1.1 Materiales empleados

Para la evaluación del comportamiento de la madera empleada en este trabajo, se han utilizado tablas de madera de pino silvestre (PNSY), *pinus sylvestris* L, variedad ibérica Svob, procedentes del Sistema Central, Sierra de Guadarrama, suministradas por el Aserradero de Maderas “El Espinar”, situado en Segovia. Esta madera corresponde a poblaciones de alta calidad.

Este aserradero clasifica las tablas de madera en tres categorías comerciales en función de las caras y cantos de la tabla libres de defectos:

- Clase “Como Cae” (CC). Engloba tablas de calidad especial, primera o segunda, recogidas en la norma UNE-EN 1611 (UNE-EN 1611-1, 2000 y UNE-EN 1611-1/A1:2003) y presentan las dos caras y un canto libres de defectos.
- Clase Tercera (TA). Presentan una cara libre de defectos.
- Clase Cuarta (CA). Se permite cualquier tipo de defectos. Es la madera que usualmente se solicita al aserradero para su uso en construcción.

Se ha trabajado sobre 41 tablas de madera, de categorías CC (11), TA (15) y CA (15), de dimensiones aproximadas 2400 x 150 mm y espesores variables comprendidos entre 18 y 40 mm.

3.1.2 Técnicas empleadas y trabajo experimental realizado

Las técnicas experimentales han tomado como punto de partida la caracterización del material, que se ha realizado tanto por técnicas visuales como por ensayos mecánicos de caracterización. Posteriormente los elementos se han ensayado de forma individual, bajo cargas estáticas y dinámicas aplicadas en forma de impacto.

3.1.2.1 Técnicas visuales

Las técnicas visuales para caracterizar la madera estructural son el sistema más antiguo y extendido. Las técnicas visuales se utilizan habitualmente para clasificar la madera en aserradero. Se basan en la inspección y valoración de las singularidades presentes en la madera que pueden cuantificarse de forma visual y en su asignación al sistema de clases de calidad nacional. En la mayoría de las ocasiones sólo se precisa de un flexómetro o de una regla.

En función de las especificaciones observadas para los parámetros objeto de valoración, se pueden definir distintas calidades de madera para cada especie estudiada. Cada país ha desarrollado sus correspondientes criterios que se han recogido en sus propias normas de clasificación visual adaptándose a las especies más frecuentes en su territorio.

La norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016), establece un sistema de clases resistentes de uso general en el marco de las normas de cálculo estructural. Indica para cada clase los valores característicos de las propiedades de resistencia y rigidez y los valores de densidad.

Todas las tablas se han clasificado visualmente utilizando la norma UNE 56544 (AENOR, 2011b), que establece un sistema de clasificación visual aplicable a la madera aserrada de sección rectangular de las principales especies de coníferas españolas. Esta norma establece dos calidades visuales: ME-1 y ME-2. En la tabla 2 del apartado 7 de la misma, se asignan clases resistentes en función de la especie y calidad de la madera aserrada de sección rectangular de espesor menor o igual a 70 mm. Se han medido y observado los siguientes defectos (figura 3.1): nudos, bolsas de resina y

entrecasco, fendas, desviación de fibra, gemas, deformaciones de la madera (curvaturas y alabeos). En función de estas singularidades existentes, la madera ha sido clasificada en clases resistentes C27, C18 o rechazo R. La letra C hace referencia al género (coníferas) y el número indica el valor mínimo de la resistencia a flexión de esa clase, en N/mm^2 .

Figura 3.1. Singularidades de la madera. Defectos observados para clasificación visual.

3.1.2.2 Ensayos de caracterización del material

En Europa, los ensayos para determinar las propiedades mecánicas de la madera se realizan de acuerdo con la norma UNE-EN 408 (AENOR, 2011a). Los valores característicos de las propiedades mecánicas que se obtienen para una calidad determinada, quedan asignados en un sistema de clases resistentes definidos en la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016).

Una vez obtenidos los valores del módulo de elasticidad longitudinal medio, $E_{0,\text{medio}}$; y densidad, ρ_k , y utilizando las expresiones contenidas en la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016), o directamente los valores característicos de la tabla 1 de la misma norma, pueden obtenerse los valores correspondientes a las siguientes características: tracción paralela a la fibra, $f_{t,0,k}$; tracción perpendicular a la fibra, $f_{t,90,k}$; compresión paralela a la fibra, $f_{c,0,k}$; compresión perpendicular a la fibra, $f_{c,90,k}$; cortante, $f_{v,k}$; módulo de elasticidad paralelo a la fibra (5º percentil), $E_{0,05}$; módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra, $E_{90,\text{medio}}$; módulo medio cortante, G_{medio} ; y densidad media, ρ_m .

Un requisito inicial para poder usar la madera en aplicaciones donde deba soportar cargas, es conocer sus condiciones de resistencia y rigidez. La norma UNE-EN 408 (AENOR, 2011a) no es de aplicación para piezas de tan

pequeña escuadría como las que forman parte de los SPPB, por lo que la obtención de las propiedades mecánicas de la madera no se ha realizado siguiendo estrictamente la norma anterior, sino que se ha optado por introducir ciertas modificaciones. En concreto cuando los ensayos de flexión se han realizado cargando en dos puntos, la distancia entre puntos de aplicación de las cargas ha sido el tercio de la luz en vez de separarlos 18 veces el canto de la pieza ya que, de aplicarse este valor, el valor tan pequeño del canto (2-4 cm) daría como resultado una dimensión de separación entre los puntos de aplicación de las cargas tan reducida que el resultado real sería comparable a la aplicación de una sola carga en el centro del vano.

3.1.2.2.1 Módulo de elasticidad longitudinal

La obtención del módulo de elasticidad longitudinal de las tablas se ha realizado utilizando la flecha en el centro de la tabla con relación a los puntos de apoyo, de manera similar a los métodos empleados en USA y Australia (Bostroöm, 1999).

Se ha despreciado el efecto de las deformaciones provocadas por la sollicitación cortante en el valor de las flechas finales debido a las reducidas dimensiones de la sección de las tablas utilizadas en este estudio.

El módulo de elasticidad longitudinal, $E_{0,medio}$, se ha obtenido colocando las tablas biapoyadas, cargándolas y midiendo los desplazamientos producidos. El valor del módulo de elasticidad, se ha obtenido aproximadamente en el intervalo de cargas $0.15 F_{máx}$ y $0.35 F_{máx}$, siendo $F_{máx}$, la carga estimada de rotura.

La materialización del ensayo se ha realizado colocando las tablas sobre apoyos indeformables, cargándolas con prismas de acero de peso conocido (figura 3.2) y midiendo los desplazamientos con un Flexímetro de la marca Saimoiragui. Además, se han colocado galgas extensiométricas en las caras superior (superficie comprimida) e inferior (superficie traccionada) de las tablas para medir la deformación de las fibras durante el ensayo.

Figura 3.2. Ensayo a flexión de tablas de madera. Laboratorio Materiales de Construcción de la ETS de Edificación de Madrid.

En la figura 3.3 se puede observar una galga extensiométrica colocada en la superficie de la tabla antes del ensayo a flexión (Imagen izquierda) y el amplificador de señal multicanal QuantumX MX840 (imagen derecha), que recibe los datos adquiridos por la galga sobre las microdeformaciones producidas en dicha superficie al someter la tabla a distintas cargas. Los datos se transmiten y procesan mediante el software Catman de HBM.

Figura 3.3. Galga extensiométrica sobre tabla y amplificador de señal (QuantumX MX840).

3.1.2.2.2 Densidad

La densidad, ρ_k , se ha obtenido a partir de probetas extraídas de las tablas ensayadas. Se han cubicado y pesado en una balanza electrónica GIBERTINI, modelo Europe 6000, con una capacidad de carga de 3300 g y precisión 0,01g. Sus dimensiones son de 210x355x120 mm³, con un diámetro de plato de 190 mm.

3.1.2.2.3 Contenido de humedad

Posteriormente las tablas se han secado a 103± 2°C hasta peso constante, para determinar el contenido de humedad según norma UNE-EN 384 (AENOR, 2010b), en estufa de convección natural para desecación y esterilización de la marca CONTERM, modelo 2000201, con capacidad de 50x60x50 cm³ y regulación de temperaturas entre 40 y 250°C.

3.1.2.2.4 Comportamiento frente a impacto

Para estudiar el comportamiento de las piezas sometidas a flexión frente a impacto, se han colocado las tablas como biapoyadas y se ha dejado caer sobre ellas una carga de 30 kp desde alturas de 20, 40 y 60 cm. La carga se ha materializado mediante dos sacos de pellets de 15 kp de peso cada uno. Los pellets tienen una densidad muy similar a la del cuerpo humano, de modo que al colocar un acelerómetro entre ellos, se puede obtener la máxima aceleración alcanzada en el impacto en función de la altura de caída y de la rigidez de la tabla ensayada. Este valor de aceleración puede compararse con el máximo que se adopta como límite por las normativas internacionales para que no aparezcan lesiones en los trabajadores cuando, como consecuencia de una caída el trabajador, se golpea con algún elemento.

En la figura 3.4 se muestran distintos momentos de la realización del ensayo.

Figura 3.4. Ensayo de impacto sobre tablas de madera.

Una falsa escuadra (figura 3.5), permite medir el desplazamiento máximo en la tabla durante el impacto.

Figura 3.5. Ensayo de impacto. Falsa escuadra para medir desplazamientos.

3.1.2.3 Técnicas estadísticas. Regresión

Se ha comprobado el comportamiento como predictores de las propiedades mecánicas de la madera, básicamente el módulo de elasticidad de algunas variables pertenecientes al conjunto de parámetros para la clasificación visual y de algunas características físicas y mecánicas obtenidas por ensayos en la madera. Dicho comportamiento se analiza mediante regresiones simples entre variables y la comparación de los coeficientes de determinación (R^2) para las diferentes variables en los distintos grupos de datos.

Con los resultados obtenidos en la caracterización experimental, se han buscado correlaciones significativas a efectos de construir modelos de predicción entre las variables.

Se ha examinado la relación existente entre pares de variables como el módulo de elasticidad con densidad y rigidez con la aceleración obtenida en los ensayos de impacto.

3.2 Resultados y análisis de los resultados obtenidos

3.2.1 Caracterización visual y resistente

Las tablas de madera de pino silvestre ensayadas se han nombrado con la designación del aserradero, en función de su clasificación comercial, con un código "AB α ($\beta\gamma$)" donde "AB" indica la clasificación comercial, " α " el número asignado a la tabla y " $\beta\gamma$ " su espesor en mm, y con una nueva designación de la forma "T α ", para mayor comodidad y donde " α " es un número que identifica la tabla.

En las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran, divididos por clases comerciales, los resultados obtenidos con la clasificación visual según UNE 56544 (AENOR, 2011b) y resistente según UNE-EN 14081-1 (AENOR, 2006), cuando se considera toda la tabla (primer valor de la celda) o cuando se considera únicamente el tercio central (segundo valor de la celda).

Tabla 3.1. Clasificación visual y resistente de las tablas “Como Cae” (CC).

	CC1 (27) T8	CC3 (31) T45	CC4 (33) T3	CC6 (24) T17	CC6 (35) T7	CC7 (26) T38
CLASIF. VISUAL	ME-1/ME-1	R/R	R/ME-2	ME-1/ME-1	R/ME-1	ME-1/ME-1
CLASIF. RESIST.	C27/C27	-/-	-/C18	C27/C27	-/C27	C27/C27
	CC7 (33) T28	CC8 (18) T4	CC8 (39) T2	CC9 (22) T5	CC11 (21) T42	
CLASIF. VISUAL	R/ME-1	ME-1/ME-1	ME-1/ME-1	ME-1/ME-1	ME-1/ME-1	
CLASIF. RESIST.	-/C27	C27/C27	C27/C27	C27/C27	C27/C27	

Tabla 3.2. Clasificación visual y resistente de las tablas “de Tercera” (TA).

	TA1 (22) T11	TA1 (36) T35	TA2 (24) T39	TA2 (30) T36	TA3 (33) T29	TA4 (32) T19	TA6 (31) T44	TA6 (33) T54
CLASIF. VISUAL	ME-1/ME-1	R/R	ME-2/ME-2	R/R	R/R	R/R	ME-1/ME-1	ME-2/ME-2
CLASIF. RESIST.	C27/C27	-/-	C18/C18	-/-	-/-	-/-	C27/C27	C18/C18
	TA7 (33) T18	TA8 (33) T15	TA9 (31) T34	TA10 (35) T9	TA11 (35) T33	TA12 (37) T1	TA13 (27) T41	
CLASIF. VISUAL	R/R	R/R	ME-2/ME-2	ME-1/ME-1	ME-2/ME-1	ME-1/ME-1	R/R	
CLASIF. RESIST.	-/-	-/-	C18/C18	C27/C27	C27/C27	C27/C27	-/-	

Tabla 3.3. Clasificación visual y resistente de las tablas “de Cuarta” (CA).

	CA1 (25) T20	CA1 (33) T30	CA2 (24) T22	CA2 (36) T46	CA3 (22) T43	CA3 (31) T31	CA4 (33) T37	CA5 (33) T40
CLASIF. VISUAL	R/R	ME-1/ME-1	R/R	R/R	R/R	R/R	ME-2/ME-2	R/ME-2
CLASIF. RESIST.	-/-	C27/C27	-/-	-/-	-/-	-/-	C18/C18	-/C18
	CA6 (26) T6	CA6 (33) T21	CA7 (34) T49	CA8 (31) T32	CA9 (34) T27	CA10 (34) T24	CA11 (35) T26	
CLASIF. VISUAL	R/R	R/R	R/ME-2	ME-2/ME-1	R/ME-1	R/ME-1	R/R	
CLASIF. RESIST.	-/-	-/-	-/C18	C18/C27	-/C27	-/C27	-/-	

En la tabla 3.4 se han agrupado los datos de las tablas 3.2 – 3.4 mostrando la correspondencia entre la clasificación comercial y la clasificación visual, para todas las tablas ensayadas, considerando toda su longitud. Los valores se indican en la forma “a/b” donde “a” representa el número absoluto de tablas correspondiente a la clasificación comercial de la columna que cumplen la clasificación comercial de la fila y “b” es el valor correspondiente en tanto por ciento. Así, por ejemplo, en la primera celda de valores nos encontramos que de las 11 tablas estudiadas de clasificación comercial “CC”, 7 han obtenido la clasificación visual ME-1, que supone un 64% del total de las mismas.

Tabla 3.4. Correspondencia entre clasificación comercial y visual considerando toda la tabla.

	CC	TA	CA	TOTAL
ME1	7/64%	4/27%	1/7%	12/29%
ME2	0/0%	4/27%	2/13%	6/15%
R	4/36%	7/47%	12/80%	23/56%
TOTAL	11/100%	15/100%	15/100%	41/100%

En la tabla 3.5 se muestra la misma información cuando se considera únicamente el tercio central de la tabla.

Tabla 3.5. Correspondencia entre la clasificación comercial y visual considerando el tercio central de la tabla.

	CC	TA	CA	TOTAL
ME1	9/82%	5/33%	4/27%	18/44%
ME2	1/9%	3/20%	3/20%	7/17%
R	1/9%	7/47%	8/53%	16/39%
TOTAL	11/100%	15/100%	15/100%	41/100%

El análisis de la tabla 3.4 permite indicar que, si se atiende a toda la longitud de la tabla, el porcentaje de madera clasificada para el total de la

muestra (ME-1+ME-2) supone un 44%, mientras que los rechazos alcanzan el 56%, valor que se sitúa muy por encima de la media de la especie.

El mismo análisis en la tabla 3.5 indica que si se atiende únicamente al tercio central, el porcentaje de madera clasificada para el total de la muestra (ME-1+ME-2) supone un 61%. El valor de rechazos obtenidos, un 39%, es algo superior al habitual en la clasificación visual del pino silvestre que se encuentra en los entornos del 23%, entre los más bajos de las coníferas españolas (Fernández-Golfín et al., 2000). Teniendo en cuenta que la norma EN 13374 (AENOR, 2013) especifica que la madera empleada en SPPB debe ser al menos de clase resistente C16, eso supone que solo el 61% de las tablas ensayadas en este estudio podrían emplearse para este fin.

El análisis de la tabla 3.4 también nos indica que existe correspondencia entre la clasificación comercial y la clasificación visual para las tablas analizadas en este estudio. Si por ejemplo se observa la primera fila de resultados, el 64% de las tablas CC son ME1, mientras que únicamente el 27% de las TA son ME1, descendiendo este porcentaje al 7% en el caso de las tablas CA. Para la clasificación R, el 36% de CC alcanzan esa clasificación y ese porcentaje crece con las tablas TA, llegando al 80% con las tablas CA.

Si se analiza únicamente el tercio central de las tablas (tabla 3.5), los resultados mejoran en cuanto a la clasificación ME1 que es alcanzada por el 82% de las tablas CC, mientras que R son el 53% de las tablas CA, en vez del 80% cuando se considera toda la tabla.

De lo anterior se puede concluir que existe relación entre la clasificación comercial y la clasificación visual para las piezas analizadas en este estudio. Además, como es lógico, la clasificación visual mejora cuando únicamente se considera el tercio central.

3.2.2 Caracterización física

En las tablas 3.6 - 3.8 se muestran, para las 41 tablas ensayadas, los resultados obtenidos relativos a la clasificación visual cuando se considera toda la tabla (CV-TT) y cuando se considera únicamente el tercio central (CV-

TC), el peso, las dimensiones, la densidad y el momento de inercia agrupados según la clase comercial asignada. Al final de cada una de las tablas se indican los valores medios para las propiedades analizadas.

La densidad ρ_k , se ha obtenido desecando las muestras y haciendo la corrección para un 12% de humedad.

Tabla 3.6. Características físicas. Tablas CC.

TABLA	NUEVA DESIGN.	CLAS. VISUAL		PESO (g)	DIMENSIÓN (mm)			DENSIDAD (g/cm ³)	INERCIA (mm ⁴)
		CV-TT	CV-TC		LONGITUD	ANCHO	ESPESOR		
CC1(27)	T8	ME-1	ME-1	5160	2480	136,4	27,5	0,55	236391,15
CC11(21)	T42	ME-1	ME-1	4560	2477	149,3	21,2	0,58	118545,79
CC3(31)	T45	R		6127,5	2515	148,0	30,9	0,53	363878,09
CC4(33)	T3	R	ME-2	6722	2475	170,3	33,2	0,48	519182,60
CC6 (35)	T7	R	ME-1	7146,5	2498	151,4	35,2	0,54	550265,92
CC6(24)	T17	ME-1	ME-1	4768	2485	153,2	23,6	0,53	166744,01
CC7(26)	T38	ME-1	ME-1	3045	2480	151,6	26,4	0,31	232450,10
CC7(33)	T28	R	ME-1	6925	2490	154,0	33,1	0,55	465396,87
CC8(18)	T4	ME-1	ME-1	4155	2480	152,5	18,1	0,61	75357,13
CC8(39)	T2	ME-1	ME-1	6480	2490	151,6	38,6	0,45	723754,21
CC9(22)	T5	ME-1	ME-1	4024	2480	153,9	22,2	0,48	140273,35
$\bar{x}$				5373,91	2486,36	152,0	28,2	0,51	326567,20
D.T.				1377,09	11,67	7,8	6,5	0,08	211939,41
C.V.				3,90	213,00	19,5	4,3	6,21	1,54

En las figuras 3.6 - 3.8 se muestran imágenes de tablas representativas de cada clase.

Figura 3.6. Imagen de la tabla CC4(33).

Tabla 3.7. Características físicas. Tablas TA.

TABLA	NUEVA DESIGN.	CLAS. VISUAL		PESO (g)	DIMENSIÓN (mm)			DENSIDAD (g/cm ³)	INERCIA (mm ⁴)
		CV-TT	CV-TC		LONGITUD	ANCHO	ESPESOR		
TA1(22)	T11	ME-1	ME-1	4423,0	2463	151,70	22,40	0,53	142085,05
TA1(36)	T35	R	R	6971,0	2494	159,50	36,05	0,49	622723,49
TA10(35)	T9	ME-1	ME-1	5785,0	2492	145,35	34,65	0,46	503899,01
TA11 (35)	T33	ME-2	ME-1	6953,5	2495	158,50	34,90	0,50	561467,08
TA12(37)	T1	ME-1	ME-1	5739,0	2495	149,40	37,45	0,41	653920,30
TA13(27)	T41	R	R	4880,0	2490	153,40	27,10	0,47	254420,43
TA2(24)	T39	ME-2	ME-2	4825,5	2470	153,00	23,60	0,54	167589,26
TA2(30)	T36	R	R	5712,0	2500	150,00	30,20	0,50	344295,10
TA3(33)	T29	R	R	5325,0	2495	156,10	32,70	0,42	454846,56
TA4(32)	T19	R	R	6012,0	2490	155,00	32,10	0,49	427233,75
TA6(31)	T44	ME-1	ME-1	5489,0	2486	148,55	31,20	0,48	375971,73
TA6(33)	T54	ME-2	ME-2	5188,0	2495	145,50	33,00	0,43	435736,13
TA7(33)	T18	R	R	6149,0	2486	154,10	32,70	0,49	449018,93
TA8(33)	T15	R	R	6053,0	2488	148,00	32,95	0,50	441211,40
TA9(31)	T34	ME-2	ME-2	5880,0	2496	149,15	30,60	0,52	356128,14
$\bar{x}$				5692,3	2489	151,82	31,44	0,48	412703,09
D.T.				715,4	10	4,35	4,25	0,04	147597,16
C.V.				8,0	248	34,93	7,41	12,66	2,80

Figura 3.7. Imagen de las tablas TA9(31) y TA2(30).

Tabla 3.8. Características físicas. Tablas CA.

TABLA	NUEVA DESIGN.	CIAS. VISUAL		PESO (g)	DIMENSIÓN (mm)			DENSIDAD (g/cm ³)	INERCI A (mm ⁴)
		CV-TT	CV-TC		LONGITUD	ANCHO	ESPESOR		
CA1(25)	T20	R	R	5117,0	2485	160,25	25,25	0,51	214981,43
CA1(33)	T30	ME-1	ME-1	5995,0	2500	152,10	33,15	0,48	461741,14
CA10(34)	T24	R	ME-1	6691,0	2490	149,10	33,70	0,53	475538,96
CA11(35)	T26	R	R	6956,0	2495	151,65	35,40	0,52	560623,06
CA2(24)	T22	R	R	4102,0	2479	151,30	23,60	0,46	165727,16
CA2(36)	T46	R	R	7058,0	2500	149,00	35,70	0,53	564949,55
CA3(22)	T43	R	R	3846,0	2480	150,00	21,90	0,47	131293,24
CA3(31)	T31	R	R	5528,0	2500	150,70	31,20	0,47	381413,26
CA4 (33)	T37	ME-2	ME-2	5718,0	2510	154,80	32,60	0,45	446933,09
CA5(33)	T40	R	ME-2	5556,0	2490	151,85	33,40	0,44	471490,50
CA6(26)	T6	R	R	3733,0	2488	143,90	25,75	0,40	204744,03
CA6(33)	T21	R	R	5188,0	2495	145,50	33,00	0,43	435736,13
CA7(34)	T49	R	ME-2	5690,0	2495	147,90	34,20	0,45	493020,80
CA8(31)	T32	ME-2	ME-1	6474,0	2489	151,90	31,40	0,55	391891,16
CA9(34)	T27	R	ME-1	5430,0	2490	146,40	33,50	0,44	458663,58
$\bar{x}$				5538,8	2492,4	150,42	30,92	0,48	390583,14
D.T.				1044,9	8,19	3,95	4,48	0,04	141859,11
C.V.				5,3	304,24	38,08	6,91	11,31	2,75

Figura 3.8. Imagen de la tabla CA2(24).

3.2.3 Ensayos estáticos a flexión. Caracterización mecánica

3.2.3.1 Medida de desplazamientos. Módulo de Elasticidad

En la tabla 3.9 se muestran, para las 41 tablas ensayadas, los desplazamientos experimentados en el punto central de la tabla cuando se aplica, en intervalos, una carga máxima de 300 N en el punto medio de la luz

entre apoyos o dos cargas puntuales, de 300 N cada una de ellas, aplicadas en los tercios de la luz. A partir de estos dos últimos ensayos carga-desplazamiento, se han calculado los módulos de elasticidad longitudinales E_1 y E_2 , con carga al centro y a tercios respectivamente.

Tabla 3.9. Ensayos estáticos a flexión. Desplazamientos

TABLA	FLECHA (mm)										INERCIA (mm ⁴)	E (N/mm ²)	
	CARGA EN EL CENTRO (N)					CARGA A TERCIOS (N)						E1	E2
	60	120	180	240	300	120	240	360	480	600			
CA1(25)	8,4	17,5	26,6	34,6	43,6	15	29,5	44,5	58		214981,426	8833	9129
CA1(33)	4,2	8,9	13	17,3	21,9	7,3	15,3	23,2	30,1	36,9	461741,135	9128	8071
CA10(34)	3,7	8	11,8	15,9	19,6	6,7	13,6	20,1	27,7	34	475538,956	9563	9524
CA11(35)	2,3	6,3	9,8	13,7	16,8	5,4	11,3	17,3	23,1	28,9	560623,056	8807	8752
CA2(24)	15,2	30	45	65	107,3	26,5					165727,161	6951	6703
CA2(36)	2,6	5,5	8,4	11,3	14,3	4,9	9,9	14,9	19,6	24,5	564949,555	10547	10422
CA3(22)	13	25,4	38,3	48,3	62,3	21,1	41,1	63,1			131293,238	10203	10192
CA3(31)	3,9	8	12,2	16,4	20,2	6,7	13,6	20,4	27,4	35,2	381413,261	10787	11351
CA4 (33)	4,2	8,9	13,1	17,7	21,6	7,6	15,7	22,3	29,9	37,3	446933,09	9206	9980
CA5(33)	4,65	9,8	14,8	19,8	24,8	8,4	17,2	25,3	35,3	45,2	471490,504	7330	7709
CA6(26)	12,3	23,2	34,6	45,6	57,6	19,8	39,8	49,8			204744,03	7403	7189
CA6(33)	3,8	8,8	13,8	18,5	23,4	7,8	17	24,6	33,7	40,7	435736,125	7931	7344
CA7(34)	4	8,5	13	17,6	21,7	7,5	15	23,6	30,4	38,3	493020,805	7789	6943
CA8(31)	3,2	6,8	10,4	14,1	17,2	5,7	11,6	17,5	23,2	29,1	391891,164	12248	12733
CA9(34)	4,1	8,1	12,1	16,3	20,1	6,9	14,3	21	27,8	34,4	458663,575	9419	9580
CC1(27)	4,5	9,2	14,1	18,8	23,3	8	16	24,2	32	39,9	236391,146	14918	15188
CC11(21)	8	16,9	24,8	33,1	43	14,4	28,5	43,5	58,5		118545,793	18451	16556
CC3(31)	3,2	6,7	10,4	13,8	17,6	5,8	11,8	17,9	23,8	30,1	363878,091	12835	13263
CC4(33)	3,2	6,8	10,3	13,8	17,4	5,9	11,9	18	23,8	30,1	519182,596	9509	9296
CC6 (35)	1,9	4	6	8	12	3,4	6,8	10,3	14	17,3	550265,924	15701	15286
CC6(24)	7,3	15,4	23	30,6	38,6	13,3	26,5	39,3			166744,015	13636	13376
CC7(26)	10,2	20,1	30,1	40,1	50,1	18,1	34,7	49,7	66,7		232450,099	7434	8443
CC7(33)	2,7	6	8,6	11,5	14,4	4,9	9,8	14,9	19,7	24,7	465396,868	14281	12403
CC8(18)	11,1	22,8	34,8	49,8	59,8	20	40				75357,1252	19109	19534
CC8(39)	3,4	7,5	11,4	15,5	19,2	6,3	13,2	19,8	27,6	34,1	723754,209	6122	6163
CC9(22)	9	18,8	28	39,2	59,2	16,6	32,8	50,8			140273,353	13390	12955
TA1(22)	10	19,1	28	37,6	46,6	16,7	32,6	48,6			142085,052	13665	12950
TA1(36)	1,9	4,2	6,5	8,9	11,2	3,4	7,4	11,4	15,4	19,4	622723,49	12065	11819
TA10(35)	2,8	6,1	9,3	12,6	15,8	5,2	11,1	16,4	21,9	27,5	503899,012	10716	11023
TA11 (35)	1,8	4,2	6,4	8,8	11,1	3,5	7,4	11,3	15,3	19,1	561467,085	13989	13445
TA12(37)	2,6	5,3	8,1	11	13,8	4,12	9,2	13,9	18,5	23,2	653920,297	9438	9579
TA13(27)	5,2	10,6	16,1	21,4	26,7	9	18,6	27,6	38,6	48,6	254420,432	12349	12857
TA2(24)	7,7	15,6	22,1	31,4	39,4	13,4	28,8	40,1	53,1		167589,264	15863	15546
TA2(30)	3,8	8,2	12,5	17	21,2	7,1	14,4	21,5	28,8	36,4	344295,1	11672	12043
TA3(33)	6,75	13,6	20,3	27,1	34,1	11,6	23	38	48,9	60,8	454846,561	5670	4315
TA4(32)	3,6	7,3	11,1	15	18,7	6,1	12,6	19,1	25,4	32,8	427233,746	10644	10601
TA6(31)	4,9	9,8	15,1	19,9	24,7	8,5	16,9	25,2	34,2	44,2	375971,731	8672	9434
TA6(33)	3,8	8,8	13,8	18,5	23,4	7,8	17	24,6	33,7	46,7	435736,125	7931	8890
TA7(33)	3,5	7,3	10,8	14,8	18,3	6,1	12,3	18,55	24,7	31,1	449018,93	10995	10490
TA8(33)	3,9	7,8	12	15,9	19,9	6,4	13	19,6	26,8	33,1	441211,401	9325	10110
TA9(31)	3,7	7,6	11,7	15,4	19,4	6,6	12,9	19,5	26,4	33,1	356128,14	11835	12525

Los valores de los módulos de elasticidad se han obtenido siguiendo las indicaciones del punto 1.2.2.1 de este capítulo. Cuando la carga se aplica en el centro de la luz se ha utilizado la siguiente expresión [3.1]:

$$E_1 = \frac{\Delta P \cdot L^3}{48I \cdot \Delta f} \quad [3.1]$$

Cuando la carga se aplica en los tercios centrales, se ha empleado la siguiente expresión [3.2]:

$$E_2 = \frac{23\Delta P \cdot L^3}{648I \cdot \Delta f} \quad [3.2]$$

Donde I es el momento de inercia de la tabla e Δf es la diferencia entre los desplazamientos experimentados por la tabla en el centro de la luz cuando se aplica una carga de valor ΔP .

Para que el valor ΔP se encuentre aproximadamente en el intervalo de cargas $0.15 F_{\text{máx}}$ y $0.35 F_{\text{máx}}$, siendo $F_{\text{máx}}$ la carga estimada de rotura, se han obtenido los diagramas carga - desplazamiento que, además, nos ofrecen una idea del comportamiento elástico de las tablas.

3.2.3.1.1 Diagramas carga - desplazamiento

En el Anexo 1 de este documento se pueden encontrar las fichas correspondientes a cada una de las tablas ensayadas que incluyen, entre otra información, los diagramas carga desplazamiento con carga al centro y a tercios. Cuando la carga se aplica en el centro de la tabla se ha alcanzado una carga de 300 N, mientras que cuando se han aplicado dos cargas puntuales en los tercios de la luz se ha llegado a una carga total de 600 N. El desplazamiento alcanzado en el primer caso, en el centro de la tabla, puede compararse con el máximo permitido para un SPPB para esas mismas condiciones de carga, que es de 55 mm.

En las figuras 3.9 - 3.12 se muestran los resultados de los diagramas carga flecha de las tablas CC1(27) y CA2(24) ensayadas a flexión, representativos

de los dos tipos de comportamiento elástico que se ha podido observar que siguen la práctica totalidad de las tablas ensayadas.

Figura 3.9. Diagrama carga-flecha. Tabla CC1(37) carga al centro.

Figura 3.10. Diagrama carga-flecha. Tabla CC1(37) carga a tercios.

Se observa un comportamiento totalmente elástico y lineal para la tabla CC1(27) cuando la carga se aplica en el centro de la pieza hasta un valor de

300N (figura 3.9) o cuando se aplican 2 cargas puntuales situadas a tercios de la luz hasta una carga total de 600N (figura 3.10).

Figura 3.11. Diagrama carga-flecha. Tabla CA2(24) carga al centro.

Figura 3.12. Diagrama carga-flecha. Tabla CA2(24) carga a tercios.

Por el contrario, la menor rigidez de la tabla CA2(24) hace que en el diagrama carga desplazamiento correspondiente a la carga aplicada en el

centro de la luz (figura 3.11) hasta un valor de 240 N, sea lineal, pero en el siguiente escalón de carga se pierde la linealidad y la deformación de la tabla aumenta más deprisa con el siguiente escalón de carga, alcanzando una flecha de aproximadamente 107 mm con una carga de 300 N. La norma UNE-EN 13374 (AENOR, 2013) indica que el máximo desplazamiento permitido para estas condiciones de carga sea de 55mm, por lo que esta tabla no podría emplearse para esta aplicación. Hay que tener en cuenta además que al desplazamiento de la tabla usada como barandilla habría que sumarle el correspondiente debido al movimiento de los postes.

El análisis de las gráficas del Anexo 1 permite comprobar que cuando la carga se aplica en el centro del vano, la mayoría de las tablas experimentan un desplazamiento inferior a 55 mm y además el comportamiento es totalmente lineal.

Un 14,6% de las tablas ensayadas, concretamente las CC9(22), CC6(35), CA2(24), CA3(22), CA6(26) y TA6(33), muestran un comportamiento que no es lineal en el último escalón de carga.

Las 5 tablas que superan el desplazamiento permitido por UNE-EN 13374 (AENOR, 2013) tienen un espesor inferior a 26 mm. Todas las tablas con un espesor igual o superior a 26 mm, independientemente de su clasificación visual o resistente han sido capaces de superar el requisito de desplazamiento de la norma UNE-EN 13374 (AENOR, 2013). Habitualmente los SPPB se montan sobre postes que también experimentan un desplazamiento cuando se aplica la carga, por lo que para obtener el desplazamiento del sistema hay que sumar, al desplazamiento de la barandilla, el de los postes. En otros trabajos se han obtenido desplazamientos para los postes que, en el caso de sujeción al forjado por cartucho de plástico embebido, no superan los 10 mm, por lo que el máximo desplazamiento que se podría permitir a las tablas usadas como barandillas de seguridad sería de 45 mm. En este caso, existirían otras dos tablas que no superarían los requisitos de la norma UNE-EN 13374 (AENOR, 2013), las tablas TA1(22) y CC7(26), siendo necesario incrementar hasta 27 mm el espesor de las tablas de este estudio para cumplir los requisitos de la norma.

3.2.3.1.2 Propiedades físicas y mecánicas. Relación

En las tablas 3.10 - 3.12 se indican, para cada una de las clasificaciones comerciales, los valores de las propiedades más representativas de todas las piezas obtenidas en los ensayos de caracterización mecánica y física: el módulo de elasticidad longitudinal con carga puntual aplicada en el centro de la tabla (E_1), el módulo de elasticidad longitudinal con dos cargas puntuales a los tercios de la luz (E_2) y la densidad. Al final de cada una de las tablas se indican los valores medios para las propiedades analizadas.

En la última columna se ha incluido el cociente entre los módulos de elasticidad obtenidos por los dos procedimientos empleados. Cuando se aplica una única carga en el punto medio, toda la tabla está sometida simultáneamente a sollicitación flectora y cortante. Cuando la carga se aplica en forma de dos cargas puntuales en el tercio de la luz, el tercio central de la pieza no está sometido a sollicitación cortante. Según esto, el valor del módulo de elasticidad obtenido por el procedimiento de aplicar una sola carga en el punto medio, debería ser superior al calculado con los valores resultantes de aplicar dos cargas puntuales a tercios. El cociente entre ambos valores permitirá apreciar la influencia del cortante en la deformación para este tipo de piezas.

Tabla 3.10. Resultados de los ensayos físicos y mecánicos en las tablas CC.

Tabla	CR TODA	CR TERCIO	Densidad (g/cm ³)	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₂ / E ₁
CC1(27)	C27	C27	0,55	14918	15188	1,02
CC3(31)	-	-	0,53	12835	13263	1,03
CC4(33)	-	C18	0,48	9509	9296	0,98
CC6(24)	C27	C27	0,53	13636	13376	0,98
CC6 (35)	-	C27	0,54	15701	15286	0,97
CC7(26)	C27	C27	0,31	7434	8443	1,14
CC7(33)	-	C27	0,55	14281	12403	0,87
CC8(18)	C27	C27	0,61	19109	19534	1,02
CC8(39)	C27	C27	0,45	6122	6163	1,01
CC9(22)	C27	C27	0,48	13390	12955	0,97
CC11(21)	C27	C27	0,58	18451	16556	0,90
$\bar{x}$			0,51	13217	12951	0,99

Tabla 3.11. Resultados de los ensayos físicos y mecánicos en las tablas TA.

Tabla	CR TODA	CR TERCIO	Densidad (g/cm ³)	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₂ / E ₁
TA1(22)	C27	C27	0,53	13665	12950	0,95
TA1(36)	-	-	0,49	12065	11819	0,98
TA2(24)	C18	C18	0,54	15863	15546	0,98
TA2(30)	-	-	0,50	11672	12043	1,03
TA3(33)	-	-	0,42	5670	4315	0,76
TA4(32)	-	-	0,49	10644	10601	1,00
TA6(31)	C27	C27	0,48	8672	9434	1,09
TA6(33)	C18	C18	0,43	7931	8890	1,12
TA7(33)	-	-	0,49	10995	10490	0,95
TA8(33)	-	-	0,50	9325	10110	1,08
TA9(31)	C18	C18	0,52	11835	12525	1,06
TA10(35)	C27	C27	0,46	10716	11023	1,03
TA11 (35)	C18	C27	0,50	13989	13445	0,96
TA12(37)	C27	C27	0,41	9438	9579	1,01
TA13(27)	-	-	0,47	12349	12857	1,04
$\bar{x}$			0,48	10989	11042	1,00

Tabla 3.12. Resultados de los ensayos físicos y mecánicos en las tablas CA.

Tabla	CR TODA	CR TERCIO	Densidad (g/cm ³)	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₂ / E ₁
CA1(25)	-	-	0,51	8833	9129	1,03
CA1(33)	C27	C27	0,48	9128	8071	0,88
CA2(24)	-	-	0,46	6951	6703	0,96
CA2(36)	-	-	0,53	10547	10422	0,99
CA3(22)	-	-	0,47	10203	10192	1,00
CA3(31)	-	-	0,47	10787	11351	1,05
CA4 (33)	C18	C18	0,45	9206	9980	1,08
CA5(33)	-	-	0,44	7330	7709	1,05
CA6(26)	-	-	0,40	7403	7189	0,97
CA6(33)	-	-	0,43	7931	7344	0,93
CA7(34)	-	C18	0,45	7789	6943	0,89
CA8(31)	C18	C18	0,55	12248	12733	1,04
CA9(34)	-	C27	0,44	9419	9580	1,02
CA10(34)	-	C18	0,53	9563	9524	1,00
CA11(35)	-	-	0,52	8807	8752	0,99
$\bar{x}$			0,47	9076	9042	0,99

Tabla 3.13. Valores medios agrupados por clases resistentes considerando toda la tabla.

CV	CR	E ₁ (MPa)	E _{norma} (MPa)	E ₁ /E _{norma}
ME-1	C27	12057	11500	1,05
ME-2	C18	11845	9000	1,32
R		10026		

En las tablas 3.13 y 3.14 se muestran los valores medios de los resultados de las tablas 3.10 - 3.12 agrupados en función de su clasificación resistente considerando toda la tabla o únicamente el tercio central. Se ha incluido también el valor fijado por la norma para la clase resistente considerada.

Tabla 3.14. Valores medios agrupados por clases resistentes considerando el tercio central.

CV	CR	E ₁ (MPa)	E _{norma} (MPa)	E ₁ /E _{norma}
ME-1	C27	12216	11500	1,06
ME-2	C18	9923	9000	1,10
R		9814		

El análisis de las tablas 3.13 y 3.14 permite comprobar que los valores estimados por la norma quedan del lado de la seguridad, para todas las clasificaciones, independientemente de considerar solo el tercio central o toda la tabla. Incluso la clasificación *R*, *rechazo*, ofrece un valor de módulo de elasticidad superior al indicado por la norma para la clase C18. Además, cuando se considera toda la tabla, las clases ME-1 y ME-2 obtienen valores de módulo de elasticidad superiores al indicado por la norma para la clase C27.

En la tabla 3.15 se ofrecen los valores medios de los resultados agrupados de acuerdo a las clases comerciales asignadas por el aserradero. En la última columna se muestra la clase resistente correspondiente al valor del módulo de elasticidad obtenido en los ensayos.

Tabla 3.15. Valores medios agrupados por clases comerciales.

CC	E_1 (MPa)	CLASE RESISTENTE
CC	13217	C 27
TA	10989	C 18
CA	9047	C 18

El 72,7% de las tablas de clasificación comercial CC superan el valor del módulo de elasticidad indicado en la norma para la clase C27 y del resto, el 9% superan el valor indicado para la clase C18.

El 46,6% de las tablas de clasificación comercial TA superan el valor del módulo de elasticidad indicado en la norma para la clase C27 y del resto, el 33,3% superan el valor indicado para la clase C18.

El 6,6% de las tablas de clasificación comercial CA superan el valor del módulo de elasticidad indicado en la norma para la clase C27 y del resto, el 46,6% superan el valor indicado para la clase C18.

Atendiendo a los valores medios, el módulo de elasticidad medio correspondiente a la clase C27 es superado por la clase comercial CC, mientras que las clases TA y CA superan ambas el valor del módulo de elasticidad correspondiente a la clase C18.

3.2.3.1.3 Regresión. Módulo de elasticidad (E) – densidad (ρ)

La tabla 3.16 muestra el resumen de los resultados de los ensayos estadísticos de regresión lineal que indican la correlación entre las variables, módulo de elasticidad obtenido experimentalmente aplicando una carga puntual en el centro de la pieza y densidad, para todas las tablas en conjunto y para todas agrupadas según las clases comerciales a las que pertenecen.

Tabla 3.16. Ecuaciones de las rectas de regresión y correlaciones E - ρ .

Clasificación Comercial	Variables	Recta de Regresión	Coefficiente Correlación	R ²
CC	E - ρ	E = 42,713 ρ -8520,037	0,848	0,719
TA	E - ρ	E = 54,312 ρ -15175,743	0,804	0,646
CA	E - ρ	E = 23,002 ρ -1881,013	0,659	0,434
Todas	E - ρ	E = 44,99 ρ -11025,835	0,776	0,602

En la figura 3.13 se muestra gráficamente la recta de regresión entre el módulo de elasticidad con carga al centro y la densidad para todas las tablas y en las siguientes figuras, 3.4 - 3.16, se muestra la misma información discriminando las tablas en función de su clasificación comercial.

Figura 3.13. Recta de regresión. E1 – ρ para todas las tablas.

Figura 3.14. Recta de regresión E1 – ρ . Tablas de clasificación comercial CC.

Figura 3.15. Recta de regresión $E_1 - \rho$. Tablas de clasificación comercial TA.

Figura 3.16. Recta de regresión $E_1 - \rho$. Tablas de clasificación comercial CA.

De los resultados obtenidos y resumidos en la tabla 3.16 y las gráficas correspondientes se observa que, cuando se consideran todas las tablas ensayadas en su conjunto, existe una relación estadísticamente significativa entre el módulo de elasticidad y la densidad ($P\text{-valor} < 0,05$), con un nivel de confianza del 95%. El coeficiente de correlación $R = 0,776$ indica una relación moderadamente fuerte entre las variables y el coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo ajustado explica el 60,21% de la variabilidad en E_1 .

Cuando los datos se desagregan en función de la clasificación comercial, los resultados son muy similares. En las tres calidades existe relación

estadísticamente significativa entre las dos variables $E_1 - \rho$, con correlaciones moderadamente fuertes en las tablas de menor calidad CA y que aumentan en las calidades superiores TA y especialmente en las CC alcanzando, en estas últimas, un coeficiente de correlación $R = 0,848$ con $R^2 = 71,9\%$.

3.2.3.2 Medida de microdeformaciones

Se han colocado 2 galgas extensiométricas a $L/2$ de la luz entre apoyos, una en la cara superior (fibra comprimida) y otra en la inferior (fibra traccionada) en 13 de las 41 tablas sometidas a ensayo. Además, en 6 de ellas se han colocado otras 4 galgas, 2 en la cara superior a $L/3$ y $L/6$ respectivamente y otras dos en la cara inferior a las mismas distancias. Se han medido las deformaciones producidas para poder comprobar el comportamiento elástico del material y la evolución de la posición de la línea neutra. Las medidas se han realizado durante el ensayo a flexión con carga puntual en el centro y con cargas a tercios de la luz.

En la tabla 3.17 se muestran los resultados de las microdeformaciones obtenidas en el ensayo estático a flexión, con carga puntual en el centro, para las 13 tablas instrumentadas con 2, 4 o 6 galgas, según el caso.

En la tabla 3.18 se indican los resultados de las microdeformaciones obtenidas en el ensayo estático a flexión cuando se aplican escalonadamente dos cargas simultáneas de 60 N cada una en cada uno de los dos tercios de la luz.

De los resultados obtenidos se puede deducir que hay dos comportamientos bien diferenciados en cuanto a la relación entre las magnitudes de las deformaciones de las fibras comprimidas y las traccionadas y en cuanto a la posición de la línea neutra después de aplicar las cargas. Las tablas TA12(37), CC8(39) y TA4(32) se analizan a continuación, en la tabla 3.19, como muestra de ambos comportamientos.

Tabla 3.17. Microdeformaciones medidas a L/2, L/3 y L/6. Carga estática al centro.

TABLA	Galga- Posición	ENSAYO ESTÁTICO - DEFORMACIONES ($\mu\text{m/m}$)															
		Carga al centro (N)															
		0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900
TA12(37)	$\varepsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U)	0	101	212	319	431	538	647	755	861	969	1081	1184	1295	1400	1509
		Inferior (D)	0	-78	-164	-248	-334	-419	-504	-585	-667	-749	-832	-910	-993	-1073	-1148
	Flecha (mm)	0	3	5	8	11	14										
CC8(39)	$\varepsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U)	0	132	264	399	529	659	800	922	1054	1187	1320	1446	1574	1703	1831
		Inferior (D)	0	-142	-284	-428	-570	-710	-850	-995	-1136	-1279	-1423	-1557	-1699	-1840	-1977
	Flecha (mm)	0	3	8	11	16	19										
CC8(18)	$\varepsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U)	0	232	455	685	897	1117	1337								
		Inferior (D)	0	-241	-486	-675	-897	-1116	-1417								
	$\varepsilon_{\text{maxL/3}}$	Superior (U)	0	62	116	171	226	277	331								
		Inferior (D)	0	-62	-121	-180	-240	-295	-357								
	$\varepsilon_{\text{maxL/6}}$	Superior (U)	0	133	255	380	507	635	754								
		Inferior (D)	0					-841									
CC9(22)	Flecha (mm)	0	11	23	35	50	60										
	$\varepsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U)	0	201	417	581	603	749	979	1169							
		Inferior (D)	0	-193	-384	-572	-591	-783	-974	-1166							
	$\varepsilon_{\text{maxL/3}}$	Superior (U)	0	137	277	414	430	565	700	830							
		Inferior (D)	0	-143	-291	-438	-454	-602	-748	-893							
	$\varepsilon_{\text{maxL/6}}$	Superior (U)	0	68	136	204	213	282	350	421							
CA6(26)		Inferior (D)	0	-53	-118	-188	-197	-278	-328	-380							
	Flecha (mm)	0	9	19	28	39	59										
	$\varepsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U)	0						3255								
		Inferior (D)	0	-262	-535	-824	-1093	-1363	-1633								
	$\varepsilon_{\text{maxL/3}}$	Superior (U)	0	94	178	268	354	434	519								
		Inferior (D)	0	-80	-162	-241	-320	-400	-484								
CC6(35)	$\varepsilon_{\text{maxL/6}}$	Superior (U)	0	220	416	616	796	947	1071								
		Inferior (D)	0	-182	-353	-524	-709	-873	-1046								
	Flecha (mm)	0	12	23	35	46	58										
	$\varepsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U)	0	62	124	184	244	306	365	427	486	546	606	664	723	780	836
		Inferior (D)	0	-59	-120	-181	-237	-301	-362	-421	-480	-543	-604	-664	-723	-783	-842
	Flecha [mm]	0	2	4	6	8	12										
CC6(35)																	

Tabla 3.17. Microdeformaciones medidas a L/2, L/3 y L/6. Carga estática al centro
(continuación)

TABLA	Galga- Posición	ENSAYO ESTÁTICO - DEFORMACIONES (μ m/m)															
		Carga al centro (N)															
		0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900
CC1(27)	$\epsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U) 0	105	212	320	425	530	645	750	850	960	1080					
		Inferior (D) 0	-115	-225	-350	-470	-590	-705	-820	-940	-1060	-1170					
	$\epsilon_{\text{maxL/3}}$	Superior (U) 0	52	104	151	205	255	305	358	402	455	502					
		Inferior (D) 0	-39	-75	-112	-155	-189	-229	-265	-301	-340	-372					
	$\epsilon_{\text{maxL/6}}$	Superior (U) 0	105	195	292	398	490	585	695	785	880	975					
		Inferior (D) 0	-98	-180	-275	-380	-470	-565	-660	-750	-840	-940					
	Flecha (mm)	0	5	9	14	19	23										
	$\epsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U) 0	120	240	340	450	580	690	800	900	1010	1140	1250	1350	1460	1550	1680
TA10(35)		Inferior (D) 0	-79	-159	-225	-320	-400	-480	-560	-640	-700	-790	-870	-950	-1025	-1100	-1180
	$\epsilon_{\text{maxL/3}}$	Superior (U) 0	35	62	90	125	150	170	200	225	250	280	298	320	335	355	380
		Inferior (D) 0	-30	-60	-90	-125	-150	-180	-210	-240	-270	-298	-325	-350	-380	-420	-440
	$\epsilon_{\text{maxL/6}}$	Superior (U) 0	76	140	210	280	350	415	480	550	610	680	750	810	875	940	1005
		Inferior (D) 0	-60	-122	-195	-250	-320	-380	-450	-510	-580	-640	-700	-770	-825	-890	-960
	Flecha (mm)	0	3	6	9	13	16										
	$\epsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U) 0	184	353	537	716	1073	1073	1241	1420	1587	1756	1923	2088			
		Inferior (D) 0	-204	-407	-597	-793	-990	-1184	-1372	-1566	-1751	-1936	-2116	-2297			
TA1(22)	Flecha (mm)	0	10	19	28	38	47										
	$\epsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U) 0	105	210	315	420	525	620	720	820	925	1025	1125	1220			
		Inferior (D) 0	-92	-184	-276	-365	-460	-555	-645	-740	-820	-915	-1000	-1095			
	$\epsilon_{\text{maxL/3}}$	Superior (U) 0	46	78	130	180	220	260	310	355	400	448	480	530			
		Inferior (D) 0	-46	-75	-110	-148	-182	-220	-258	-295	-335	-375	-410	-445			
	$\epsilon_{\text{maxL/6}}$	Superior (U) 0	80	150	225	308	380	460	530	605	685	760	840	910			
		Inferior (D) 0	-75	-142	-220	-298	-385	-440	-520	-590	-680	-740	-800	-880			
	Flecha (mm)	0	4	8	12	16	20										
CC6(24)	$\epsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U) 0	161	324	487	634	798	958	1103	1263	1425	1592	1741	1924	2068	2223	2405
		Inferior (D) 0	-161	-324	-488	-648	-798	-955	-1098	-1254	-1412	-1572	-1713	-1874	-2024	-2171	-2343
	Flecha (mm)	0	7	15	23	31	39										
TA7(33)	$\epsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U) 0	103	201	301	403	505	606	703	808	904	998	1115	1216	1317	1419	1518
		Inferior (D) 0	-86	-174	-264	-352	-443	-533	-619	-710	-795	-870	-980	-1065	-1153	-1237	-1331
	Flecha (mm)	0	4	7	11	15	18										
	$\epsilon_{\text{maxL/2}}$	Superior (U) 0	104	206	309	412	516	622	720	817	917	1038	1132				
		Inferior (D) 0	-112	-239	-368	-508	-649	-800	-941	-1091	-1262	-1419	-1586				
	Flecha (mm)	0	4	7	11	15	19										

Tabla 3.18. Microdeformaciones medidas a L/2, L/3 y L/6. Carga estática a tercios.

TABLA	CLAS. VISUAL		Galga- Posición	ENSAYO ESTÁTICO - DEFORMACIONES (µm/m)					
	CV-TT	CV-TC		Carga a tercios [N]					
				0	120	240	360	480	
TA12(37)	ME-1	ME-1	ε _{max} L/2	Superior (U)	0	164,8	317,8	471,3	628,8
			Inferior (D)	0	-100,1	-217,2	-335,2	-453,2	
			Flecha [mm]	0	4,12	9,2	13,9	18,5	
CC8(39)	ME-1	ME-1	ε _{max} L/2	Superior (U)	0	189,8	378,4	563,3	760,2
			Inferior (D)	0	-203,5	-402	-604,8	-818,3	
			Flecha [mm]	0	6,3	13,2	19,8	27,6	
CC6 (35)	R	ME-1	ε _{max} L/2	Superior (U)	0	87,53	173,2	258,4	344,9
			Inferior (D)	0	-81,65	-165,5	-247,9	-334,6	
			Flecha [mm]	0	3,4	6,8	10,3	14	
TA1(22)	ME-1	ME-1	ε _{max} L/2	Superior (U)	0	261,8	512,2	752,7	1001
			Inferior (D)	0	-284,5	-561,1	-829,6	-1107	
			Flecha [mm]	0	16,7	32,6	48,6		
TA7(33)	R	R	ε _{max} L/2	Superior (U)	0	155	293,8	443,5	601
			Inferior (D)	0	-122,7	-254,2	-384,9	525	
			Flecha [mm]	0	6,1	12,3	18,55	24,7	
TA4(32)	R	R	ε _{max} L/2	Superior (U)	0	151,4	303,8	454,8	601
			Inferior (D)	0	-161,5	-346,2	-543,9	-745	
			Flecha [mm]	0	6,1	12,6	19,1	25,4	

En la tabla 3.19 se indican los valores de las microdeformaciones, en cara superior (ϵ_s) e inferior (ϵ_i), de la tabla TA12(37) obtenidas en el ensayo a flexión, cuando la carga se aplica en escalones de 60 N tanto en el punto central como a tercios de la luz.

Tabla 3.19. Microdeformaciones en cara inferior (ϵ_i) y superior (ϵ_s) a L/2 de la tabla TA12 (37).

Carga en el centro de la luz			Carga a tercios de la luz		
P (N)	ϵ_i ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_s ($\mu\text{m/m}$)	P (N)	ϵ_i ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_s ($\mu\text{m/m}$)
60	77,97	100,9	120	90	144
120	163,9	211,6	240	209	301
180	247,6	318,8	360	325	452
240	333,5	430,8	480	443	608
300	418,5	537,8			
360	503,5	646,6			
420	584,8	754,9			
480	666,8	860,7			
540	748,8	968,8			
600	831,7	1081			
660	910	1184			
720	993,3	1295			
780	1073	1400			
840	1148	1509			
900	1246	1638			

El análisis de los valores de la tabla 3.19 permite comprobar que las microdeformaciones de las caras superior e inferior no coinciden para los distintos escalones de carga lo que implica, suponiendo que las secciones se mantienen planas a medida que el ensayo transcurre, que la fibra neutra se desplaza del centro de gravedad durante el proceso de carga. Esto se debe a que la madera posee módulos de elasticidad distintos a tracción y a compresión. En ambas configuraciones de ensayo (carga en la sección central y carga a tercios), la deformación de la fibra superior ha sido mayor que la de la fibra inferior, lo que supone que la línea neutra se sitúa por debajo del centro de gravedad.

En las figuras 3.17 y 3.18, se muestra la representación gráfica de los valores de las microdeformaciones obtenidas en ambas caras de la tabla TA12(37) reflejados en la tabla 3.19 anterior.

Figura 3.17. Ensayos estáticos TA12 (37). Microdeformaciones en L/2 carga al centro.

Figura 3.18. Ensayos estáticos TA12 (37). Microdeformaciones en L/2, carga a tercios.

El análisis de las figuras 3.17 y 3.18 permite comprobar en cada gráfico que la altura correspondiente a los saltos producidos en el valor de las microdeformaciones al aplicar las cargas es la misma. Eso significa que el comportamiento es lineal. Este aspecto también se había comprobado con los gráficos carga desplazamiento de las tablas ensayadas. Además, después del ensayo la microdeformación final coincide con la inicial, eso significa que el material tiene un comportamiento elástico.

En las figuras 3.19 y 3.20 se muestran las gráficas que relacionan las microdeformaciones medidas en el centro de las tablas (en $L/2$) de las caras superior e inferior de las tablas CC8(39) y TA4(32) cuando se aplican las cargas tanto en el centro como a tercios de la luz. Se ha obtenido el comportamiento en el proceso de carga y en el proceso de descarga. Se comprueba que su comportamiento también es elástico y que la línea neutra se desplaza del centro de gravedad de la sección durante el proceso de carga. Sin embargo, en estos dos últimos casos, la deformación de la fibra inferior es superior a la de la fibra superior, lo que significa que el centro de gravedad se desplaza hacia arriba, de forma contraria a lo que ocurría en el caso anterior.

Figura 3.19. Ensayos estáticos CC8(39). Evolución de las microdeformaciones en $L/2$.

El módulo de elasticidad de la madera trabajando a tracción es superior al de la madera trabajando a compresión. Debido a esta razón, cuando se somete una pieza de madera a flexión, la línea neutra debería desplazarse por debajo del centro de gravedad. Esto es así siempre que las secciones se mantengan planas después de la deformación y siempre que la pieza ensayada no tenga defectos. Si la pieza ensayada presenta defectos localizados solo en la cara inferior, puede ocurrir que la zona traccionada presente una menor rigidez que la zona comprimida, lo que justificaría el comportamiento anómalo del desplazamiento de la fibra neutra en algunos casos.

Figura 3.20. Ensayos estáticos TA4(32). Evolución de las microdeformaciones en L/2.

Figura 3.21. Ensayos estáticos CC9(22). Microdeformaciones medidas en L/2, L/3 y L/6.

Se han colocado 3 galgas extensométricas en la tabla CC9(22) en la cara superior y 3 en la cara inferior con una separación de 40 cm desde el apoyo, lo que supone que se pueden medir las deformaciones en 3 secciones equidistantes desde el apoyo al centro de la luz. Posteriormente se han aplicado cargas discretas de 60N en el punto medio de la tabla hasta alcanzar una carga de 360N (6 escalones de carga). En la figura 3.21 se muestran las gráficas obtenidas. En las gráficas de la izquierda se han representado las deformaciones de las fibras comprimidas (U: cara superior que soporta las cargas) y en las de la derecha se ofrecen las deformaciones de la fibra traccionada (D: cara inferior). La sección N está situada a 40 cm del apoyo (L/6), la M a 80 cm (L/3) y la F a 120 cm (L/2), es decir en la sección central.

Se ha indicado entre paréntesis el valor de la deformación obtenida tras la aplicación de toda la carga. Puede comprobarse en este caso que, en cada sección, las deformaciones superior e inferior son muy similares lo que indica que la línea neutra se mantiene aproximadamente en el centro de gravedad de la sección. Suponiendo que en esta pieza todas las hipótesis de la Resistencia de Materiales fuesen válidas hasta el nivel de cargas alcanzado, la deformación en la sección M debería ser el 85% de la sección central, mientras que en la sección N debería ser el 48%. Estos datos se han obtenido a partir de la ley de la elástica (deformada) de una viga ideal, obteniendo el desplazamiento de las secciones consideradas y suponiendo que existe una relación lineal entre deformaciones y desplazamientos. Sin embargo, las deformaciones obtenidas experimentalmente son un 15% (sección M) y un 40% (sección N) menores a las deformaciones teóricas. Estos resultados ponen en cuestión la validez de las hipótesis de la Resistencia de Materiales para el estudio de este tipo de piezas con comportamientos marcadamente distintos a tracción y a compresión y con singularidades y defectos relevantes.

3.2.4 Ensayo dinámico de impacto

3.2.4.1 Aceleraciones y desplazamientos obtenidos

En las figuras 3.22 – 3.25 se muestran los resultados obtenidos cuando se someten las tablas CC8(39), CC9(22), CA4(33), TA8(33), objeto de este

estudio, a ensayos de impacto con energías de 60J, 120J y 180J materializadas mediante la caída de una carga de 300N desde alturas de 20 cm, 40 cm y 60 cm respectivamente.

El eje de abscisas representa el tiempo de duración del ensayo mientras que el eje de ordenadas muestra la aceleración producida durante el impacto. La aceleración se indica por un número que es el factor por el que hay que multiplicar la aceleración de la gravedad (g) para obtener la aceleración experimentada por el cuerpo que impacta durante el ensayo. El primer “pico” de la gráfica representa la máxima aceleración producida durante el impacto. El resto de la gráfica corresponde a rebotes o caída de la masa al suelo.

Figura 3.22. Ensayos dinámicos CC8(39). Aceleraciones.

Figura 3.23. Ensayos dinámicos CC9(22). Aceleraciones.

Figura 3.24. Ensayos dinámicos CA4(33). Aceleraciones.

Figura 3.25. Ensayos dinámicos TA8(33). Aceleraciones.

En las tablas 3.20 – 3.29 se muestran los valores obtenidos durante el ensayo de impacto en todas las tablas analizadas, disgregadas por clasificación comercial y energías de impacto. Se ofrece el valor de la máxima aceleración producida g , el máximo desplazamiento de la tabla medido con la falsa escuadra δ [mm] y las deformaciones $\mathcal{E}_{max}$ medidas con las galgas extensométricas en la sección central o en secciones situadas a 40 cm (L/6), 80 cm (L/3) y 120 cm (L/2) de los apoyos, para algunas de las tablas.

Tabla 3.20. Resultados ensayo dinámico tablas CC. Energía de impacto 60 (J).

TABLA	TABLA	ENSAYO DINÁMICO							
		60 (J)							
		g	δ (mm)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-U)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-D)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-U)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-D)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-U)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-D)
CC1(27)	T8	8,90	110	2498	-2700	2402	-2315	1230	-1001
CC11(21)	T42	19,15	142						
CC3(31)	T45	18,06	80						
CC4(33)	T3	5,37	92						
CC6 (35)	T7	3,57	45	1343	-1371				
CC6(24)	T17	3,36	153	3653	-3227				
CC7(26)	T38	7,58	167						
CC7(33)	T28	18,07	76						
CC8(18)	T4	4,80	214	3680	-3785	2143	830		
CC8(39)	T2	3,58	89	3065	-3322				
CC9(22)	T5	7,37	178	3702	-3726	2370	-1130	1423	-3036

Tabla 3.21. Resultados ensayo dinámico tablas CA. Energía de impacto 60 (J).

TABLA	TABLA	ENSAYO DINÁMICO							
		60 (J)							
		g	δ (mm)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-U)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-D)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-U)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-D)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-U)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-D)
CA1(25)	T20	6,27	Rotura		-2679				
CA1(33)	T30	17,79	99						
CA10(34)	T24	14,61	101						
CA11(35)	T26	10,53	87						
CA2(24)	T22	16,75	Rotura						
CA2(36)	T46	18,35	85						
CA3(22)	T43	3,30	215						
CA3(31)	T31	5,29	95						
CA4 (33)	T37	5,24	110						
CA5(33)	T40	19,19	90						
CA6(26)	T6	18,13	195		-3738	1564	-3393	1535	-1417
CA6(33)	T21	1,64	100	746	-2560				
CA7(34)	T49	3,80	96						
CA8(31)	T32	7,14	69						
CA9(34)	T27	9,60	93						

Tabla 3.22. Resultados ensayo dinámico tablas TA. Energía de impacto 60 (J).

TABLA	TABLA	ENSAYO DINÁMICO							
		60 (J)							
		g	δ (mm)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-U)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-D)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-U)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-D)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-U)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-D)
TA1(22)	T11	11,7	148	3104	-3126				
TA1(36)	T35	6,3	60						
TA10(35)	T9	4,6	80	2765			-863	863	-1774
TA11 (35)	T33	4,9	50						
TA12(37)	T1	5,8	73	2987					
TA13(27)	T41	5,6	113						
TA2(24)	T39	15,5	146						
TA2(30)	T36		105						
TA3(33)	T29	9,3	144						
TA4(32)	T19	11,2	93	2652	-3586				
TA6(31)	T44	7,7	114						
TA6(33)	T54	2,3	185						
TA7(33)	T18	7,6	75	2219	-1966				
TA8(33)	T15	12,8	89	2558	-2202	1839	-1837	1087	-969,9

Tabla 3.23. Resultados ensayo dinámico tablas CC. Energía de impacto 120 (J).

TABLA	TABLA	ENSAYO DINÁMICO							
		120 (J)							
		g	δ (mm)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-U)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-D)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-U)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-D)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-U)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-D)
CC1(27)	T8	13,62	142	3088	-3437	2981	-2993	1565	-1305
CC11(21)	T42	13,86	194						
CC3(31)	T45	18,07	87						
CC4(33)	T3								
CC6 (35)	T7	11,33	54	1658	-1662				
CC6(24)	T17	18,07	193	3941	-3916				
CC7(26)	T38	5,76	220						
CC7(33)	T28	18,17	96						
CC8(18)	T4	11,09	240						
CC8(39)	T2	12,64	121	4176	-4478				
CC9(22)	T5	18,01	242	4987	-4691	2808	-1467	1824	-3806

Tabla 3.24. Resultados ensayo dinámico tablas CA. Energía de impacto 120 (J).

TABLA	TABLA	ENSAYO DINÁMICO							
		120 (J)							
		g	δ (mm)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-U)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-D)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-U)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-D)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-U)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-D)
CA1(25)	T20	17,99	Rotura						
CA1(33)	T30	16,81	124						
CA10(34)	T24	8,13	121						
CA11(35)	T26	18,13	232						
CA2(24)	T22	8,02							
CA2(36)	T46	16,65	95						
CA3(22)	T43	4,20	Rotura						
CA3(31)	T31	18,11	129						
CA4 (33)	T37	14,42							
CA5(33)	T40	12,37	143						
CA6(26)	T6	18,04			-3758	942	-3658		-1563
CA6(33)	T21	1,82	116	612	-3022				
CA7(34)	T49	5,00	135						
CA8(31)	T32	18,37	115						
CA9(34)	T27	5,44	129						

Tabla 3.25. Resultados ensayo dinámico tablas TA. Energía de impacto 120 (J).

TABLA	TABLA	ENSAYO DINÁMICO							
		120 (J)							
		g	δ (mm)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-U)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-D)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-U)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-D)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-U)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-D)
TA1(22)	T11	18,17	199	4076	-4374				
TA1(36)	T35	5,57	90						
TA10(35)	T9	8,29	109	2813			-1156	1122	-2358
TA11 (35)	T33	7,95	84						
TA12(37)	T1	12,84	101	4292	-3034				
TA13(27)	T41	17,51	141						
TA2(24)	T39	13,47	176						
TA2(30)	T36		160						
TA3(33)	T29	18,21	283						
TA4(32)	T19	18,22	118	2914	-4069				
TA6(31)	T44	18,07	130						
TA6(33)	T54	5,09	198						
TA7(33)	T18	18,19	151	4533	-2854				
TA8(33)	T15	17,02	115	3378	-2869	2523	-2505	1478	-1339
TA9(31)	T34		95						

Tabla 3.26. Resultados ensayo dinámico tablas CA. Energía de impacto 180 (J).

TABLA	TABLA	DINÁMICO	
		180 (J)	
		g	δ (mm)
CA1(25)	T20		
CA1(33)	T30	18,20	135
CA10(34)	T24	11,78	207
CA11(35)	T26		
CA2(24)	T22	18,12	
CA2(36)	T46	18,39	150
CA3(22)	T43		
CA3(31)	T31	18,08	153
CA4 (33)	T37	19,02	
CA5(33)	T40	10,03	185
CA6(26)	T6		
CA6(33)	T21	14,47	120
CA7(34)	T49	2,80	
CA8(31)	T32	18,50	139
CA9(34)	T27	9,69	140

Tabla 3.27. Resultados ensayo dinámico tablas CC. Energía de impacto 180 (J).

TABLA	TABLA	ENSAYO DINÁMICO							
		180 (J)							
		g	δ (mm)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-U)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-D)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-U)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-D)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-U)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-D)
CC1(27)	T8	18,15	153	3321	-3791	3268	-3183	1603	-1356
CC11(21)	T42	6,00	100						
CC3(31)	T45	4,99	89						
CC4(33)	T3								
CC6 (35)	T7	7,93	75	2133	-2222				
CC6(24)	T17	10,35	225	4711	-6106				
CC7(26)	T38	8,55	265						
CC7(33)	T28	18,13	105						
CC8(18)	T4								
CC8(39)	T2	18,12	145	5093	-5493				
CC9(22)	T5	18,08	262	5959	-5486	3123	-1736	5959	-4506

Tabla 3.28. Resultados ensayo dinámico tablas TA. Energía de impacto 180 (J)

TABLA	TABLA	ENSAYO DINÁMICO							
		180 (J)							
		g	δ (mm)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-U)	$\epsilon_{\max L/2}$ (F-D)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-U)	$\epsilon_{\max L/3}$ (M-D)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-U)	$\epsilon_{\max L/6}$ (N-D)
TA1(22)	T11	18,21	251	4977	-5247				
TA1(36)	T35	7,92	Rotur						
TA10(35)	T9	18,03	133	4911		4753	-1327	1235	-2850
TA11 (35)	T33	12,00	95						
TA12(37)	T1	18,19	119	4931	-3558				
TA13(27)	T41	9,01	236						
TA2(24)	T39	7,74	170						
TA2(30)	T36		Rotur						
TA3(33)	T29								
TA4(32)	T19	18,10	162						
TA6(31)	T44	18,21	175						
TA6(33)	T54	5,71	212						
TA7(33)	T18								
TA8(33)	T15	18,19	143	4545	-2246	3074	-3017	1811	-1621
TA9(31)	T34		180						

3.2.4.2 Rigidez. Relación con aceleración y desplazamientos

A continuación se ha obtenido la relación existente entre la rigidez de las tablas y los resultados obtenidos en los ensayos de impacto para las distintas energías de impacto. La rigidez de las tablas se ha obtenido como el producto del momento de inercia de la sección por el módulo de elasticidad deducido a partir de los ensayos estáticos a flexión con carga puntual en el centro de la pieza. Este valor de rigidez se ha relacionado con el máximo desplazamiento alcanzado durante el ensayo de impacto y las máximas aceleraciones alcanzadas durante los impactos correspondientes.

En las tablas T29 – T31 se muestran los valores obtenidos durante el ensayo de impacto en todas las tablas analizadas, disgregadas por clasificación comercial. Se ofrecen los valores de rigidez K , máxima aceleración producida g y máximo desplazamiento δ (mm) en la sección central. La última fila indica las medias obtenidas en cada una de las distintas energías de impacto para su comparación.

Tabla 3.29. Resultados ensayo dinámico tablas CC.

TABLA	TABLA	K.10 ⁹ (Nmm ²)	ENSAYO DINÁMICO					
			60 (J)		120 (J)		180 (J)	
			g	δ (mm)	g	δ (mm)	g	δ (mm)
CC1(27)	T8	3,53	8,90	110	13,62	142	18,15	153
CC11(21)	T42	2,19	19,15	142	13,86	194	6,00	
CC3(31)	T45	4,67	18,06	80	18,07	87	4,99	89
CC4(33)	T3	4,94	5,37	92				
CC6 (35)	T7	8,64	3,57	45	11,33	54	7,93	75
CC6(24)	T17	2,27	3,36	153	18,07	193	10,35	225
CC7(26)	T38	1,73	7,58	167	5,76	220	8,55	265
CC7(33)	T28	6,65	18,07	76	18,17	96	18,13	105
CC8(18)	T4	1,44	4,80	214	11,09	240		
CC8(39)	T2	4,43	3,58	89	12,64	121	18,12	145
CC9(22)	T5	1,88	7,37	178	18,01	242	18,08	262
$\bar{x}$		3,85	9,07	122,36	14,06	158,90	12,25	164,88
D.T.		2,29	6,27	51,89	4,11	67,87	5,76	76,56
C.V.		1,68	1,45	2,36	3,42	2,34	2,13	2,15

La media de los resultados obtenidos en las tablas de clasificación comercial CC nos muestran un comportamiento anómalo en cuanto a la aceleración máxima producida en el momento del impacto. Cuando el cuerpo cae desde una altura de 20 cm (60J), la aceleración media registrada es menor que cuando la altura de caída es de 40cm, sin embargo, disminuye con respecto a esta si la altura la elevamos a 60 cm. Esto podría explicarse por el desgaste de las tablas CC11(21), CC3(31) al haber sufrido las deformaciones importantes por los impacto anteriores que, en algún caso ha llegado a la rotura de las mismas.

En cuanto a los desplazamientos el comportamiento es el esperado, aumentando con la energía del impacto.

Tabla 3.30. Resultados ensayo dinámico tablas CA.

TABLA	TABLA	K.10 ⁹ (Nmm ²)	ENSAYO DINÁMICO					
			60 (J)				60 (J)	
			g	δ (mm)	g	δ (mm)	g	δ (mm)
CA1(25)	T20	1,90	6,27		17,99			
CA1(33)	T30	4,21	17,79	99	16,81	124	18,20	135
CA10(34)	T24	4,55	14,61	101	8,13	121	11,78	207
CA11(35)	T26	4,94	10,53	87	18,13	232		
CA2(24)	T22	1,08	16,75		8,02		18,12	
CA2(36)	T46	5,96	18,35	85	16,65	95	18,39	150
CA3(22)	T43	1,34	3,30	215	4,20			
CA3(31)	T31	4,11	5,29	95	18,11	129	18,08	153
CA4 (33)	T37	4,11	5,24	110	14,42		19,02	
CA5(33)	T40	3,46	19,19	90	12,37	143	10,03	185
CA6(26)	T6	1,52	18,13	195	18,04			
CA6(33)	T21	3,46	1,64	100	1,82	116	14,47	120
CA7(34)	T49	3,84	3,80	96	5,00	135	2,80	
CA8(31)	T32	4,80	7,14	69	18,37	115	18,50	139
CA9(34)	T27	4,32	9,60	93	5,44	129	9,69	140
$\bar{x}$		3,57	10,51	110,35	12,23	133,90	14,46	153,63
D.T.		1,46	6,35	43,31	6,12	36,83	5,28	28,60
C.V.		2,44	1,65	2,55	2,00	3,64	2,74	5,37

La media de los resultados obtenidos en las tablas de clasificación comercial CA, sin embargo, reflejan un comportamiento natural tanto en cuanto a la aceleración experimentada en el momento del impacto como respecto a los desplazamientos aumentando progresivamente con la altura de caída del cuerpo.

Tabla 3.31. Resultados ensayo dinámico tablas TA.

TABLA	TABLA	K.10 ⁹ (Nmm ²)	ENSAYO DINÁMICO					
			60 (J)			60 (J)		
			g	δ (mm)	g	g	δ (mm)	g
TA1(22)	T11	1,94	11,69	148	18,17	199	18,21	251
TA1(36)	T35	7,51	6,33	60	5,57	90	7,92	
TA10(35)	T9	5,40	4,63	80	8,29	109	18,03	133
TA11 (35)	T33	7,85	4,88	50	7,95	84	12,00	95
TA13(27)	T41	3,14	5,64	113	17,51	141	9,01	236
TA2(24)	T39	2,66	15,49	146	13,47	176	7,74	170
TA2(30)	T36	4,02		105		160		
TA3(33)	T29	2,58	9,29	144	18,21	283		
TA4(32)	T19	4,55	11,22	93	18,22	118	18,10	162
TA6(31)	T44	3,26	7,72	114	18,07	130	18,21	175
TA6(33)	T54	3,46	2,30	185	5,09	198	5,71	212
TA7(33)	T18	4,94	7,58	75	18,19	151		
TA8(33)	T15	4,11	12,88	89	17,02	115	18,19	143
TA9(31)	T34	4,21	3,70	90		95		180
TA12(37)	T1	6,17	5,794	73	12,84	101	18,19	119
	$\bar{x}$	4,39	7,80	104,33	13,74	143,33	13,76	170,55
	D.T.	1,74	3,83	37,62	5,23	53,65	5,26	48,16
	C.V.	2,52	2,04	2,77	2,62	2,67	2,61	3,54

La media de los resultados obtenidos en las tablas de clasificación comercial TA, conduce a las mismas conclusiones anteriores.

La tabla 3.32 muestra el resumen de los valores medios tanto de aceleraciones como de desplazamientos ya comentados.

Tabla 3.32. Resumen de resultados. Ensayo dinámico.

TABLA	Media	Aceleración			Desplazamiento		
		60 (J)	120 (J)	180 (J)	60 (J)	120 (J)	180 (J)
		g	g	g	δ [mm]	δ [mm]	δ [mm]
CC	$\bar{x}$	9,07	14,06	12,25	122,36	158,90	164,88
CA	$\bar{x}$	10,51	12,23	14,46	110,35	133,90	153,63
TA	$\bar{x}$	7,80	13,74	13,76	104,33	143,33	170,55

En las figuras 3.26 - 3.28 se muestran los valores de rigidez relacionados con las máximas aceleraciones experimentadas bajo impactos de 60J, 120J y 180J respectivamente para todas las tablas. La ecuación de la recta de regresión y los correspondientes coeficientes de determinación se han reflejado en la tabla 3.33.

Figura 3.26. Relación entre la rigidez de las tablas y la máxima aceleración alcanzada en los ensayos de impacto de 60J.

Figura 3.27. Relación entre la rigidez de las tablas y la máxima aceleración alcanzada en los ensayos de impacto de 120J.

Figura 3.28. Relación entre la rigidez de las tablas y la máxima aceleración alcanzada en los ensayos de impacto de 180J.

Tabla 3.33. Coeficientes de determinación rigidez - aceleración.

Energía de Impacto	Variables	Recta de regresión	Coeficiente correlación	R ²
60J	K - g	$K = -0,034 k + 4,253$	-0,103	0,011
120J	K - g	$K = -0,02 k + 4,178$	-0,057	0,003
180J	K - g	$K = 0,001 k + 4,182$	0,002	0,000

De los resultados obtenidos, podemos concluir que no se puede afirmar que exista una relación estadísticamente significativa entre la aceleración y la rigidez de las tablas ensayadas.

En las figuras 3.29 - 3.31 se muestran los valores de rigidez relacionados esta vez con los máximos desplazamientos alcanzados bajo impactos de 60J, 120J y 180J para todas las tablas. Así mismo, la ecuación de la recta de regresión y los correspondientes coeficientes de determinación se han reflejado en la tabla 3.34.

Figura 3.29. Relación entre la rigidez de las tablas y el máximo desplazamiento alcanzado en los ensayos de impacto de 60J.

Figura 3.30. Relación entre la rigidez de las tablas y el máximo desplazamiento alcanzado en los ensayos de impacto de 120J.

Figura 3.31. Relación entre la rigidez de las tablas y el máximo desplazamiento alcanzado en los ensayos de impacto de 180J.

Tabla 3.34. Coeficientes de determinación rigidez - desplazamiento.

Energía de Impacto	Variables	Recta de regresión	Coefficiente correlación	R ²
60J	K- δ	$K = -0,035 \delta + 7,981$	-0,866	0,751
120J	K- δ	$K = -0,025\delta + 7,777$	-0,763	0,582
180J	K- δ	$K = -0,023 \delta + 7,964$	-0,718	0,515

De los resultados obtenidos, resumidos en la tabla 3.34 y las gráficas correspondientes se observa que, cuando se consideran todas las tablas ensayadas en su conjunto, existe una relación estadísticamente significativa, entre la rigidez y los desplazamientos experimentados cuando un cuerpo de 300N impacta sobre ellas con energías de 60J, 120 y 180J. En el caso de impactos de 120J y 180J los coeficientes de correlación y determinación indican que la relación es moderadamente fuerte. En el caso de impactos de 60J la relación entre las variables estudiadas mejora con $R = 0,866$ y $R^2 = 75\%$.

3.2.4.3 Medida de microdeformaciones y aceleraciones bajo cargas estáticas y de impacto

En las figuras 3.32 -3.34 se muestran los resultados obtenidos en términos de deformaciones de las fibras superior e inferior de la sección central en ensayos estáticos y dinámicos preliminares, efectuados sobre la tabla CC1(24) bajo cargas de impacto con energías de 60J y 120J.

Figura 3.32. Tabla CC1(24). Microdeformaciones bajo cargas estáticas.

Figura 3.33. Tabla CC1(24). Microdeformaciones bajo cargas dinámicas 60J.

Figura 3.34. Tabla CC1(24). Microdeformaciones bajo cargas dinámicas 120J.

Las deformaciones correspondientes a carga estática se han medido hasta una carga de 600N (10 escalones de carga), mientras que las deformaciones bajo carga de impacto se han obtenido con cargas de 300N dejadas caer desde 20cm y 40cm. Puede comprobarse que, en todos los casos, la deformación de la fibra inferior es mayor a la de la fibra superior, lo que indica que la fibra neutra se ha desplazado por encima del centro de gravedad de la sección.

En la tabla 3.35 se muestra el valor de la deformación alcanzado bajo una carga estática de 300N y para la misma carga aplicada en forma de impacto con energías de 60J y 120J en la tabla CC1(24), tanto en cara superior (comprimida) como en cara inferior (traccionada).

Tabla 3.35. Deformaciones producidas en CC1(24) con cargas estáticas y dinámicas.

Energía de Impacto	Deformación superior ($\mu\epsilon$)	Deformación inferior ($\mu\epsilon$)
Carga estática (300N)	550	950
Carga dinámica (60J)	2800	3450
Carga dinámica (120J)	3550	4230

El análisis de la tabla 3.35 permite comprobar que, si se mide el efecto dinámico de la carga por el valor de las microdeformaciones máximas alcanzadas durante el impacto, en grandes números, el efecto de la carga lanzada desde 20 cm es aproximadamente 4 veces el de la carga estática, mientras que si la carga se lanza desde 40 cm, este efecto se mayor en 5 veces.

En la figura 3.35 se muestran, a modo de ejemplo, las deformaciones experimentadas por la tabla CC2, estudiada en ensayos preliminares de esta tesis doctoral, en las tres secciones instrumentadas, distinguiendo las deformaciones en la cara superior (U) e inferior (D). Las secciones a 0,40 m (L/6), 0,80 m (L/3) y 1,20 m (L/2) del apoyo se han designado como N, M y F, respectivamente. Las deformaciones se producen por aplicación de pesos sucesivos, colocándose en el centro del vano hasta 18 piezas superpuestas, de 60 N cada una, resultando un total aplicado de 1080 N.

Figura 3.35. Tabla CC2. Deformaciones bajo cargas en ensayo estático.

Las figuras 3.36 Y 3.37 contienen los datos relativos a las deformaciones experimentadas por la misma tabla CC2 bajo los impactos de 120J y 180J, respectivamente. El código de subíndices empleado es el mismo que el de la figura 3.35.

Figura 3.36. Tabla CC2. Deformaciones bajo cargas de impacto de 120J.

Figura 3.37. Tabla CC2. Deformaciones bajo cargas de impacto de 180J.

En la tabla 3.36 se indican los máximos valores de deformación (microdeformaciones) experimentados en el ensayo estático y en los dos ensayos de impacto en las seis fibras de la tabla CC2 ensayada.

Tabla 3.36. Máximos valores de deformación durante los ensayos realizados.

Ensayo	Posición	Sección L/2	Sección L/3	Sección L/6
Estático 1080 N	(U)	630	370	335
	(D)	1175	695	390
Estático 300 N	(U)	170	120	85
	(D)	360	185	100
Impacto 120 J	(U)	920	540	520
	(D)	780	-	615
Impacto 180 J	(U)	1250	760	720
	(D)	2500	1420	900

Las máximas aceleraciones producidas en el momento del impacto sobre los cuerpos que impactan han sido 16 g y 12 g.

Los resultados muestran que, tanto en los ensayos estáticos como en los ensayos dinámicos, la deformación producida en la fibra inferior es muy superior a la producida en la fibra superior. Esto indica de nuevo que, manteniendo la hipótesis de secciones planas antes y después de la deformación, la línea neutra se desplaza por encima del centro de gravedad de la sección.

En la tabla 3.37 se indica la relación entre la deformación de la fibra superior y de la fibra inferior obtenida durante la realización de los ensayos en todas las secciones estudiadas.

Tabla 3.37. Relación entre las deformaciones de las fibras inferior y superior.

ENSAYO	Sección L/2	Sección L/3	Sección L/6
Estático 1080N	1.86	1.87	1.16
Estático 300N	2.11	1.54	1.18
Impacto 120 J	1.93	-	1.18
Impacto 180 J	2.00	1.87	1.25

Puede comprobarse que existe una buena concordancia entre la relación de las deformaciones obtenidas en régimen dinámico (carga de impacto) y en régimen estático, lo que apunta a que, según este punto de vista, la Hipótesis de Rayleigh, empleada en el cálculo dinámico clásico según la cual la deformada estática y dinámica son semejantes, puede ser empleada para obtener el efecto dinámico de la carga mediante la aplicación del coeficiente de impacto. Si se toma la máxima deformación obtenida en cada ensayo como parámetro para determinar el efecto dinámico de la carga, se obtendrían valores de coeficiente de impacto para las alturas de 60cm y 40cm de 6,9 y 4,9. Analíticamente, los valores obtenidos serían 6,3 y 5,2 lo que demuestra

que puede emplearse la teoría clásica de impacto para evaluar barandillas de seguridad realizadas con tablas de madera y sometidas a acciones de impacto.

En la tabla 3.38 se muestra la relación entre la deformación de las fibras superior e inferior situadas en la sección central (tomada como referencia) con las de las fibras de la sección situada más cerca del apoyo (L/6).

Tabla 3.38 Relación entre las deformaciones de fibras situadas en distintas secciones.

Ensayo	Posición	Sección L/2	Sección L/6
Estático 300 N	(U)	1	2,00
	(D)	1	3,60
Impacto 120 J	(U)	1	1,77
	(D)	1	2,90
Impacto 180 J	(U)	1	1,74
	(D)	1	2,78

El análisis de la tabla 3.38 permite comprobar que la deformación en la sección más cercana al apoyo (L/6) es significativamente superior en el caso de carga estática a las deformaciones provocadas por la misma a carga aplicada en forma de impacto. Además, para un impacto de 120J, la relación es menor que para un impacto de 180J. Esto sugiere que cuando la carga se aplica en forma de impacto, las deformaciones se concentran bajo el punto de aplicación de la carga, produciéndose en esa sección un efecto localizado de la deformación que se transmite al resto de la pieza en menor medida cuanto mayor es la velocidad a la que se aplica la carga (mayor altura de caída).

Las máximas aceleraciones producidas sobre los cuerpos que impactan (que simulan muy aproximadamente la densidad del cuerpo humano) han sido 16g y 12g, valores muy superiores a los admitidos por las recomendaciones internacionales como asumibles por el cuerpo humano sin sufrir lesiones graves. La energía de un trabajador que tropieza y golpea contra una barandilla de seguridad que lo detiene es de aproximadamente de 180J. Esto indica que no todos los sistemas son válidos como barandillas de seguridad y

es preciso realizar un estudio acerca de las aceleraciones que se producirían en el cuerpo en caso de impactar contra ellos.

En la figura 3.38 se muestran las fotografías correspondientes a la tabla TA2(30), (T36), que han roto después de los ensayos de impacto.

Figura 3.38. Fotografías de la tabla TA2(30) durante los ensayos de impacto.

En la figura 3.38 se puede comprobar que la tabla TA2(30) presenta un nudo pasadizo que ocupa algo más del 25% del ancho de la misma tanto en la cara comprimida como en la traccionada. El nudo está situado a 5 cm de la sección central, que es la más solicitada después del impacto. La rotura se produce inicialmente por el nudo bajo un impacto de 180J. Posteriormente progresa por rasante con separación de las fibras de forma longitudinal y siguiendo su desviación. La rotura por rasante ocupa una extensión de aproximadamente 40 cm, hasta el colapso de la pieza.

En las figuras 3.39 y 3.40 se muestran las tablas T51 antes y después de romper bajo un impacto de 120J. La situación es muy similar a la de la figura anterior. La tabla T51 posee un nudo pasante de las mismas dimensiones y localización que la T36. La rotura se produce por el nudo y progresa por rasante siguiendo la dirección de las fibras. En este caso, la rotura de la tabla se produce con un impacto de menor energía.

Figura 3.39. Fotografías de la tabla T51 durante los ensayos de impacto.

Figura 3.40. Fotografías de la tabla T34 durante los ensayos de impacto.

3.3 Conclusiones

Si se atiende a toda la longitud de la tabla, el porcentaje de madera clasificada para el total de la muestra (ME-1+ME-2) supone un 44%, mientras que los rechazos alcanzan el 56%, valor que se sitúa muy por encima de la media de la especie.

Si se atiende únicamente al tercio central de la tabla, el porcentaje de madera clasificada para el total de la muestra (ME-1+ME-2) supone un 61%. El valor de rechazos obtenidos es algo superior al habitual en la clasificación visual del pino silvestre.

Solo el 61% de las tablas ensayadas en este estudio podrían emplearse para SPPB (clase resistente igual o superior a C16).

Existe relación entre la clasificación comercial y la clasificación visual para las piezas analizadas en este estudio. La clasificación visual mejora cuando únicamente se considera el tercio central.

Los valores estimados por la norma quedan del lado de la seguridad, para todas las clasificaciones, independientemente de considerar solo el tercio central o toda la tabla.

La clasificación rechazo ofrece un valor de módulo de elasticidad superior al indicado por la norma para la clase C18.

Cuando se considera toda la tabla, la clase ME1 obtiene valores de módulo de elasticidad superiores al indicado por la norma para la clase C27.

El módulo de elasticidad correspondiente a la clase C27 es superado por la clase comercial CC mientras que las clases TA y CA superan ampliamente el valor del módulo de elasticidad correspondiente a la clase C 18.

Existe una buena correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad, con un coeficiente de determinación $R^2=0,602$ para todas las tablas ensayadas tomadas en conjunto. Cuando el estudio se realiza discriminando las tablas por calidades comerciales, la correlación obtenida mejora cuanto mayor es la calidad de la tabla, obteniéndose coeficientes de correlación $R^2=0,646$ y $R^2=0,719$ para la clases comerciales TA y CC respectivamente.

Todas las tablas con un espesor igual o superior a 27 mm, independientemente de su clasificación visual o resistente han sido capaces de superar el requisito de desplazamiento de la norma UNE-EN 13374 (AENOR, 2013).

Los valores de las microdeformaciones de las caras superior e inferior no coinciden para los distintos escalones de carga lo que indica, suponiendo que las secciones se mantienen planas a medida que el ensayo transcurre, que la fibra neutra se desplaza del centro de gravedad durante el proceso de carga.

El desplazamiento de la fibra neutra se produce hacia arriba o hacia abajo debido a las singularidades y defectos de las tablas de madera.

En un amplio abanico de cargas el comportamiento experimentado ha sido elástico y lineal.

Los resultados obtenidos respecto a la relación entre las deformaciones de fibras de distintas secciones bajo cargas estáticas ponen en cuestión la validez de las hipótesis de la Resistencia de Materiales para el estudio de este tipo de piezas con comportamientos marcadamente distintos a tracción y a compresión y con singularidades y defectos relevantes.

No se puede afirmar que exista una relación estadísticamente significativa entre la aceleración y la rigidez de las tablas ensayadas.

Se puede afirmar que existe una relación estadísticamente significativa entre la rigidez y los desplazamientos experimentados cuando un cuerpo de 300N impacta sobre ellas con energías de 60J, 120 y 180J. En el caso de impactos de 120J y 180J los coeficientes de correlación y determinación indican que la relación es moderadamente fuerte. En el caso de impactos de 60J la relación entre las variables estudiadas mejora con $R= 0,866$ y $R^2= 75\%$.

Puede emplearse la Hipótesis de Rayleigh para calcular barandillas de seguridad compuestas con tablas de madera en sus elementos horizontales.

Para impactos de 120J y 180J se han obtenido, en los elementos que impactan, aceleraciones superiores a las que puede asumir el cuerpo humano sin experimentar graves lesiones.

Las normas deberían especificar rigideces máximas de los elementos que reciben los impactos en los casos de accidentes para así limitar los efectos nocivos sobre los trabajadores accidentados.

En las tablas con nudos significativos, la rotura se produce por el nudo y progresa por rasante siguiendo la dirección de las fibras.

4 EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA SOMETIDOS A COMPRESIÓN LONGITUDINAL A LAS FIBRAS

4.1 Introducción

Tradicionalmente se admite que el diagrama tensión - deformación de una pieza de madera sometida a un esfuerzo de compresión longitudinal a la fibra hasta su rotura, experimenta una primera fase lineal, seguida de otra en la cual se pierde la linealidad y se pierde rigidez hasta alcanzar la tensión máxima. La rotura sucede después de grandes deformaciones durante las cuales no se produce una gran disminución en el valor de la máxima tensión alcanzada (Argüelles, 1969). Este tipo de sollicitación se produce con frecuencia en edificación en casos como por ejemplo apeos y apuntalamientos (figura 4.1)

Figura 4.1. Elementos de madera trabajando a compresión longitudinal a las fibras.

4.1.1 Objetivos

En este capítulo se analiza el comportamiento a compresión de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría sometidas a un esfuerzo de compresión longitudinal a las fibras. Se han obtenido las propiedades mecánicas asociadas a este tipo de sollicitación, se han comprobado las correlaciones que pueden emplearse con éxito y el ajuste de los valores obtenidos con los estimados por las normas de clasificación visual y resistente de la madera en uso.

Se ha elaborado una documentación completa con información detallada sobre las propiedades físicas y mecánicas de cada una de las piezas objeto de este estudio que se presenta en forma de fichas en el Anexo 2 de este documento. Además, se muestran imágenes de las piezas antes y después de someterse a ensayo así como los diagramas tensión - deformación resultado de los mismos.

4.1.2 Materiales y métodos

Se han ensayado a compresión en sentido longitudinal a la fibra y hasta rotura 11 piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría de unas dimensiones aproximadas de 27 mm de espesor, 140 mm de anchura y 300 mm de altura.

Los ensayos se han realizado en la prensa de ensayos universal, marca IBERTEST, modelo MIB-60/AM, que utiliza el software Wintest 32, controlando el desplazamiento a una velocidad de 0,3 mm/min. Todas las tablas ensayadas son ME1 según la clasificación visual de UNE 56544 (AENOR, 2011b) y les corresponde una clasificación mecánica C27 según UNE-EN 1912 (AENOR, 2012).

4.2 Resultados obtenidos

Después del ensayo a compresión hasta rotura se han obtenido los siguientes resultados: Tensión de rotura, deformación máxima (correspondiente a la tensión de rotura), deformación última (correspondiente a la del agotamiento del material), módulo de elasticidad, densidad de energía de deformación máxima (área encerrada por el diagrama tensión deformación hasta el punto de tensión máxima), densidad de energía de deformación última (área total encerrada por el diagrama tensión deformación), ductilidad en términos de deformación (obtenida como el cociente entre la deformación última y la deformación máxima), ductilidad en términos de densidad de energía (obtenida como el cociente entre la densidad de energía última y la densidad de energía máxima) y densidad. En la tabla 4.1 se indican los valores obtenidos para cada una de las piezas ensayadas junto a los correspondientes valores medios para cada propiedad obtenida.

Tabla 4.1. Valores obtenidos en el ensayo de compresión longitudinal.

Probeta	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	A _{máx.}	A _u	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx.}}$	A _u /A _{máx.}	ρ (Kg/m ³)
CC1(27)a1	52,03	0,0077	0,0081	7782	0,23	0,24	1,05	1,08	483,70
CC1(27)b1	42,14	0,0067	0,0099	8001	0,18	0,29	1,48	1,66	519,33
CC2(27)b1	17,61	0,0041	0,0243	4507	0,04	0,52	5,93	12,77	470,54
CC2(27)b2	38,10	0,0080	0,0312	6190	0,18	0,86	3,90	4,69	459,28
CC4(27)a1	48,90	0,0079	0,0096	8210	0,24	0,37	1,22	1,54	534,25
CC4(27)a2	53,68	0,0080	0,0120	8673	0,26	0,43	1,50	1,68	534,89
CC5(27)a1	39,21	0,0067	0,0157	7063	0,15	0,56	2,34	3,81	524,88
CC5(27)b2	19,54	0,0043	0,0169	7294	0,06	0,27	3,93	4,86	477,25
CC6(27)a1	20,87	0,0048	0,0070	5773	0,06	0,10	1,46	1,68	561,47
CC7(27)a1	60,86	0,0076	0,0103	9722	0,27	0,41	1,36	1,56	615,81
CC8(27)b	43,34	0,0088	0,0109	6620	0,23	0,31	1,24	1,37	430,94
$\bar{x}$	39,66	0,0068	0,0142	7257,8	0,17	0,40	2,31	3,34	510,21
D.T.	14,66	0,0016	0,0075	1454,9	0,08	0,20	1,59	3,42	52,44
C.V.	2,70	4,1199	1,8936	5,0	2,04	1,99	1,46	0,98	9,73

4.3 Análisis y discusión de los resultados

4.3.1 Tensiones de rotura y módulos de elasticidad

La media de los valores de la tensión de rotura ha sido de 39,66 MPa y la media de los módulos de elasticidad de 7258 MPa. Si se comparan estos valores con los estimados por la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016) en función de la clasificación visual de la madera (22 MPa para la tensión de rotura y 11500 MPa para el módulo de elasticidad) se puede afirmar que la norma es conservadora cuando se trata de estimar los valores de tensión de rotura y queda del lado de la inseguridad cuando estima los valores del módulo de elasticidad. En este punto hay que tener en cuenta que el valor de la tensión de rotura estimado por la norma es un valor característico, que se ha comparado con un valor medio experimental. Para la densidad, se ha obtenido experimentalmente un valor medio de 510 kg/m^3 , mientras que la norma predice un valor medio de 450 kg/m^3 , un 13% inferior.

4.3.2 Diagramas tensión - deformación y forma de rotura

En la figura 4.2 se muestra el diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)a1.

Figura 4.2. Diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)a1.

Este diagrama es representativo del comportamiento de dos de las piezas ensayadas, CC1(27)a1 y CC4(27)a1. Ambas piezas han mostrado un comportamiento relativamente frágil y muy alejado del que se indica como patrón en la literatura estudiada. El diagrama es prácticamente lineal hasta rotura, alcanzando la carga máxima de ensayo para una deformación de un 7,7‰. La rotura se produce para una deformación del 8,1‰. Esto supone una ductilidad muy baja (1,05 medida en términos de deformaciones o de 1,08 medida en términos de densidad de energía de deformación). En la figura 4.3 puede comprobarse el estado de deformación de la pieza instantes antes de la rotura.

Figura 4.3. Fotografía de la pieza CC1(27)a1 antes de la rotura.

En otros casos la rotura se produce con mayores niveles de deformación. Así por ejemplo en la figura 4.4 se muestra el diagrama tensión deformación hasta rotura de la pieza CC1(27)b1.

Figura 4.4. Diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)b1.

Puede apreciarse como el comportamiento de la pieza es algo más dúctil que en el caso anterior, apareciendo una rama de descarga después de alcanzarse la máxima carga de ensayo. En la figura 4.5 se muestra una fotografía del momento en el que se produce el fallo de la pieza.

Figura 4.5. Fotografía de la pieza CC1(27)b1 en el instante de la rotura.

En este caso los valores de ductilidad medidos en términos de deformaciones (1,48) o de energías (1,66) son algo superiores a los anteriores.

4.3.3 Correlaciones entre las variables mecánicas

A continuación se han obtenido las correlaciones entre las propiedades mecánicas estudiadas y sus correspondientes coeficientes. Se han analizado las correlaciones entre las siguientes variables: módulo de elasticidad y tensión de rotura; módulo de elasticidad y densidad; tensión de rotura y densidad; ductilidad en términos de deformación y ductilidad en términos de energía; módulo de elasticidad y ductilidad en términos de deformación; módulo de elasticidad y ductilidad en términos de energía; tensión de rotura y ductilidad en términos de deformación; tensión de rotura y ductilidad en términos de energía; densidad y ductilidad en términos de deformación; densidad y ductilidad en términos de energía.

En las figuras 4.6 - 4.15 se representan gráficamente las correlaciones entre las distintas variables y en la tabla 4.2 se muestra un resumen con las ecuaciones de las rectas de regresión y el coeficiente de correlación correspondiente.

Figura 4.6. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

Figura 4.7. Correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad.

Figura 4.8. Correlación entre la tensión de rotura y la densidad.

Figura 4.9. Correlación entre la ductilidad en términos de deformación y la ductilidad en términos de energía.

Figura 4.10. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 4.11. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de energía.

Figura 4.12. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 4.13. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de energía.

Figura 4.14. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 4.15. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de energía.

Tabla 4.2 Ecuaciones de las rectas de regresión, R y R² entre las variables estudiadas.

Variables	Recta de Regresión	R	R ²
E - $\sigma_{\text{máx}}$	$E = 82,047 \sigma_{\text{máx}} + 4003,559$	0,827	0,684
E - ρ	$E = 16,171 \rho - 992,971$	0,583	0,340
$\sigma_{\text{máx}} - \rho$	$\sigma_{\text{máx}} = 0,104 \rho - 13,346$	0,372	0,138
$\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} - A_u / A_{\text{máx}}$	$\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} = 0,44 A_u / A_{\text{máx}} + 0,84$	0,950	0,902
E - $\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}}$	$E = -614,922 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} + 8677,531$	-0,670	0,449
E - $A_u / A_{\text{máx}}$	$E = -295,508 A_u / A_{\text{máx}} + 8243,536$	-0,695	0,483
$\sigma_{\text{máx}} - \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}}$	$\sigma_{\text{máx}} = -6,446 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} + 54,545$	-0,697	0,486
$\sigma_{\text{máx}} - A_u / A_{\text{máx}}$	$\sigma_{\text{máx}} = -2,791 A_u / A_{\text{máx}} + 48,972$	-0,651	0,424
$\rho - \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}}$	$\rho = -14,213 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} + 543,029$	-0,430	0,185
$\rho - A_u / A_{\text{máx}}$	$\rho = -5,495 A_u / A_{\text{máx}} + 528,544$	-0,358	0,128

El análisis de las figuras 4.6 - 4.15 y de la tabla 4.2 indican que no se puede afirmar que exista correlación entre la densidad y cualquiera de las variables estudiadas. La mejor correlación se da entre la ductilidad evaluada en términos de deformación y la ductilidad evaluada en términos de energía de deformación, con un coeficiente de determinación altísimo (R²=0,90). Existe una buena correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura (R²=0,68). Los coeficientes de determinación obtenidos entre el módulo de elasticidad o la tensión de rotura con la ductilidad son muy similares, oscilando entre los valores 0,42 y 0,49.

4.4 Conclusiones

El sistema establecido por las normas UNE para estimar propiedades mecánicas de la madera es conservador cuando se trata de estimar los valores de tensión de rotura y queda del lado de la inseguridad cuando estima los valores del módulo de elasticidad para este tipo de sollicitación y esta especie de madera de pequeña escuadría.

No existe ninguna correlación entre la densidad y cualquiera de las variables estudiadas.

Existe una correlación excelente entre la ductilidad evaluada en términos de deformación y la ductilidad evaluada en términos de energía de deformación.

Existe una buena correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

Los coeficientes de determinación obtenidos entre el módulo de elasticidad o la tensión de rotura con la ductilidad son muy similares, oscilando entre los valores 0,42 y 0,49.

5 EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA SOMETIDOS A COMPRESIÓN TRANSVERSAL A LAS FIBRAS

5.1 Introducción

En numerosos detalles estructurales de construcciones realizadas con madera el esfuerzo de compresión transversal a las fibras juega un papel muy importante y en muchas ocasiones condiciona el diseño (Leijten et al., 2010).

Numerosos autores consideran el problema de la compresión transversal a las fibras tan antiguo como el de la resolución de una viga biapoyada. En el siglo XIX, con la aparición de las traviesas de madera para el ferrocarril, se realizaron numerosos ensayos para poder asegurar la capacidad de carga. A principios del siglo XX, la ingeniería de las estructuras de madera se vio en la necesidad de obtener la capacidad de carga de elementos bajo cargas puntuales. Un ejemplo de ello se encuentra en las estructuras de madera, utilizadas principalmente en Estados Unidos y Canadá, formadas por marcos ligeros en donde se coloca una carrera de madera entre las vigas de piso y los elementos verticales en los que descansan (Leijten et al., 2012).

En construcciones realizadas en España, este tipo de sollicitación se produce con frecuencia en edificación en casos como por ejemplo las bases de andamio o los apoyos de vigas (figura 5.1).

El diagrama tensión deformación de una pieza de madera sometida a un esfuerzo de compresión transversal a la fibra hasta su rotura experimenta una primera fase lineal seguida de otra en la cual se pierde la linealidad y se pierde rigidez hasta alcanzar la tensión máxima. Finalmente se produce la rotura antecedida de grandes deformaciones durante las cuales no se produce una gran disminución en el valor de la máxima tensión alcanzada. Como orientación, ha sido usual asignar a las coníferas una resistencia a compresión perpendicular a las fibras del orden de 1/5 a 1/7 de la resistencia a compresión axial, oscilando su valor absoluto entre 3,5 MPa y 12,0 MPa (Argüelles et al., 1988).

Figura 5.1. Elementos de madera trabajando a compresión transversal a las fibras.

5.1.1 Objetivos

En este capítulo se analiza el comportamiento a compresión de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría sometidas a un esfuerzo de compresión transversal a las fibras. Se han obtenido las propiedades mecánicas asociadas a este tipo de sollicitación, se ha comprobado qué correlaciones pueden emplearse con éxito y el ajuste de los valores obtenidos con los estimados por las normas de clasificación visual y resistente de la madera en uso.

Se ha elaborado una documentación completa con información detallada sobre las propiedades físicas y mecánicas de cada una de las piezas objeto de este estudio que se presenta en forma de fichas en el Anexo 3 de este documento donde, además, se encuentra una descripción gráfica de algún momento de los ensayos a los que se les ha sometido así como los diagramas tensión - deformación resultado de los mismos.

5.1.2 Materiales y métodos

Se han ensayado a compresión en sentido transversal a la fibra y hasta rotura 22 piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría de unas dimensiones aproximadas de 27 mm de espesor y 140 mm de altura. El ancho de las piezas ha sido muy variable y está comprendido entre 68 y 150 mm.

Los ensayos se han realizado en la prensa de ensayos universal, marca IBERTEST, modelo MIB-60/AM, que utiliza el software Wintest 32, controlando

el desplazamiento a una velocidad de 0,3 mm/min. Todas las tablas ensayadas son ME1 según la clasificación visual de UNE 56544 (AENOR, 2011b) y les corresponde una clasificación mecánica C27 según UNE-EN 1912 (AENOR, 2012).

5.2 Resultados obtenidos

Después del ensayo a compresión hasta rotura se han obtenido los siguientes resultados: Tensión de rotura, módulo de elasticidad, deformación máxima (correspondiente a la tensión de rotura), deformación última (correspondiente a la del agotamiento del material), densidad de energía de deformación máxima (área encerrada por el diagrama tensión - deformación hasta el punto de tensión máxima), densidad de energía de deformación última (área total encerrada por el diagrama tensión - deformación), ductilidad en términos de deformación (obtenida como el cociente entre la deformación última y la deformación máxima), ductilidad en términos de densidad de energía (obtenida como el cociente entre la densidad de energía última y la densidad de energía máxima) y densidad.

En la tabla 5.1 se indican los valores obtenidos para cada una de las piezas ensayadas junto a los correspondientes valores medios para cada propiedad obtenida.

Tabla 5.1. Valores obtenidos en el ensayo de compresión transversal.

Probeta	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	$\epsilon_{\text{máx}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	A _{máx}	A _u	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$	A _u /A _{máx}	ρ (Kg/m ³)
CC1(27)a3	5,24	0,03	0,12	324,78	0,13	0,52	3,52	4,08	486,66
CC2(27)a3	3,80	0,04	0,09	205,91	0,09	0,29	2,65	3,20	433,98
CC2(27)b3	4,29	0,04	0,15	202,50	0,13	0,56	3,46	4,29	444,48
CC3(27)a1	4,06	0,04	0,09	237,36	0,13	0,32	2,22	2,53	505,23
CC3(27)b3	1,58	0,03	0,04	196,09	0,03	0,05	1,36	1,43	509,18
CC3(27)b2	4,94	0,04	0,09	280,09	0,13	0,36	2,21	2,79	517,51
CC4(27)b3	5,81	0,03	0,08	373,33	0,11	0,40	2,95	3,50	549,28
CC5(27)a2	4,45	0,03	0,11	223,16	0,08	0,41	4,30	5,08	513,64
CC5(27)a3	5,36	0,04	0,12	300,76	0,17	0,54	2,72	3,19	478,90
CC5(27)b3	1,36	0,01	0,04	272,95	0,02	0,04	2,36	2,50	462,77
CC6(27)a2	7,18	0,09	0,12	403,50	0,57	0,78	1,31	1,37	597,09
CC6(27)b3	4,92	0,08	0,12	277,91	0,32	0,54	1,63	1,69	561,02
CC7(27)b2	1,59	0,01	0,02	379,89	0,01	0,03	2,23	2,46	648,31
CC7(27)b3	6,16	0,02	0,09	458,67	0,11	0,47	3,53	4,38	676,52
CC8(27)a3	1,19	0,01	0,02	265,46	0,01	0,02	2,17	2,40	461,65
CC8(27)a4	2,37	0,01	0,02	255,33	0,02	0,04	1,87	2,21	463,87
CC8(27)b3	4,40	0,03	0,11	256,97	0,09	0,38	3,74	4,25	436,88
CC9(27)a3	4,76	0,02	0,10	266,58	0,08	0,42	4,13	5,60	526,09
CC9(27)a4	4,47	0,02	0,10	245,75	0,07	0,37	4,21	5,51	530,02
CC9(27)b3	6,50	0,03	0,07	368,02	0,11	0,37	2,79	3,37	557,44
CC10(27)b2	1,92	0,01	0,06	453,51	0,01	0,11	9,69	11,50	573,58
CC10(27)b3	6,16	0,02	0,13	480,43	0,08	0,73	6,95	9,63	611,00
$\bar{x}$	4,20	0,03	0,09	305,86	0,11	0,35	3,27	3,95	524,78
D.T.	1,80	0,02	0,04	86,73	0,12	0,22	1,91	2,48	67,14
C.V.	2,34	1,50	2,23	3,53	0,92	1,57	1,72	1,59	7,82

5.3 Análisis y discusión de los resultados

5.3.1 Tensiones de rotura y módulos de elasticidad

La media de los valores de la tensión de rotura ha sido de 4,20 MPa, de los módulos de elasticidad 305,86 MPa y de la densidad 524,78 kg/m³. Si se

comparan estos valores con los estimados por la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016) en función de la clasificación visual de la madera (2,6 MPa para la tensión de rotura, 380 MPa para el módulo de elasticidad y 450 kg/m^3 para la densidad) se puede afirmar que la utilización del sistema establecido por las normas UNE para estimar propiedades resistentes y físicas de la madera estudiada en este capítulo, queda muy del lado de la seguridad cuando se estima la tensión de rotura (61%) y la densidad (17%), y queda del lado de la inseguridad cuando se estima el módulo de elasticidad (24%). Hay que apuntar que el valor de tensión de rotura indicado por la norma UNE-EN 338 es un valor característico que se ha comparado con el valor medio obtenido en los ensayos.

Por otra parte, el valor medio del módulo de elasticidad obtenido en los ensayos es prácticamente coincidente con el que ya se indicaba hace décadas en la norma DIN 1052 en su versión vigente en 1978, que establecía un módulo de elasticidad de 300MPa para madera de conífera (Möhler et al., 1987).

5.3.2 Diagramas tensión deformación y forma de rotura

En la figura 5.2 se muestra el diagrama tensión deformación de la pieza CC3(27)a1.

Figura 5.2. Diagrama tensión deformación de la pieza CC3(27)a1.

Este diagrama es indicativo del comportamiento de un conjunto de las piezas ensayadas. El primer tramo del diagrama es lineal y es donde se ha calculado el módulo de elasticidad. Posteriormente el diagrama pierde la linealidad y la rigidez, alcanzando la carga máxima de ensayo para una deformación de un 41%. Posteriormente la carga necesaria para seguir deformando la probeta disminuye, pero no de forma importante, y la rotura se produce para grandes deformaciones (91,1%). Esto supone una ductilidad de la pieza de 2,22 medida en términos de deformaciones o de 2,53 medida en términos de densidad de energía de deformación.

En la figura 5.3 puede comprobarse el estado de deformación de la pieza instantes antes de la rotura. La pieza rompe por aplastamiento de la probeta y flexión con pandeo en el plano vertical.

Figura 5.3. Fotografía de la pieza CC3(27)a1 antes de la rotura.

En otros casos la rotura se produce por aplastamiento de una de las zonas de la pieza en contacto con los platos de la prensa de ensayo. Así por ejemplo en la figura 5.4 se muestra el diagrama tensión deformación hasta rotura de la pieza CC1(27)a3.

Puede apreciarse como el comportamiento de la pieza no es tan regular como en el caso anterior, apareciendo distintos escalones hasta que se produce la rotura.

Figura 5.4. Diagrama tensión deformación de la pieza CC1(27)a3.

En la figura 5.5 se muestra una fotografía del momento en el que se produce el fallo de la pieza.

Figura 5.5. Imagen de la pieza CC1(27)a3 antes de la rotura.

En este caso los valores de ductilidad medidos en términos de deformaciones (3,52) o de energías (4,08) son algo superiores a los anteriores.

En elementos de mayor espesor la rotura puede producirse por la división de la pieza, siguiendo los anillos de crecimiento, que se constituyen en superficies débiles de fractura debido a la escasa resistencia a la cohesión entre las distintas capas de la pieza (Lourenço et al., 2007).

5.3.3 Correlaciones entre las variables mecánicas

A continuación se han obtenido las correlaciones entre las propiedades mecánicas estudiadas y sus correspondientes coeficientes. Se han analizado las correlaciones entre las siguientes variables: Módulo de elasticidad y tensión de rotura; módulo de elasticidad y densidad; tensión de rotura y densidad; ductilidad en términos de deformación y ductilidad en términos de energía; módulo de elasticidad y ductilidad en términos de deformación; módulo de elasticidad y ductilidad en términos de energía; tensión de rotura y ductilidad en términos de deformación; tensión de rotura y ductilidad en términos de energía; densidad y ductilidad en términos de deformación; densidad y ductilidad en términos de energía.

En las figuras 5.6 - 5.15 se muestran los gráficos obtenidos y en la tabla 5.2 se indica un resumen con las ecuaciones de las rectas de regresión y el coeficiente de correlación correspondiente.

Figura 5.6. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

Figura 5.7. Correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad.

Figura 5.8. Correlación entre la tensión de rotura y la densidad.

Figura 5.9. Correlación entre la ductilidad en términos de deformación y la ductilidad en términos de energía.

Figura 5.10. Correlación entre el módulo de elasticidad y ductilidad en términos de deformación.

Figura 5.11. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de energía.

Figura 5.12. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 5.13. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de energía.

Figura 5.14. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 5.15. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de energía.

Tabla 5.2. Ecuaciones de las rectas de regresión y coeficiente de correlación.

Variables	Recta de Regresión	R	R ²
E - $\sigma_{\text{máx}}$	$E = 17,609 \sigma_{\text{máx}} + 231,822$	0,365	0,365
E - ρ	$E = 1,024 \rho - 231,715$	0,793	0,629
$\sigma_{\text{máx}}$ - ρ	$\sigma_{\text{máx}} = 0,009 \rho - 0,356$	0,324	0,105
$\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} - A_u / A_{\text{máx}}$	$\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} = 0,763 A_u / A_{\text{máx}} + 0,258$	0,991	0,983
E - $\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}}$	$E = 21,78 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} + 234,58$	0,479	0,229
E - $A_u / A_{\text{máx}}$	$E = 16,956 A_u / A_{\text{máx}} + 238,839$	0,485	0,235
$\sigma_{\text{máx}}$ - $\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}}$	$\sigma_{\text{máx}} = 0,012 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} + 4,164$	0,013	0,000
$\sigma_{\text{máx}}$ - $A_u / A_{\text{máx}}$	$\sigma_{\text{máx}} = 0,05 A_u / A_{\text{máx}} + 4,008$	0,068	0,005
ρ - $\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}}$	$\rho = 7,812 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} + 499,209$	0,222	0,049
ρ - $A_u / A_{\text{máx}}$	$\rho = 6,599 A_u / A_{\text{máx}} + 498,693$	0,244	0,059

Las figuras 5.6 - 5.8 muestran las gráficas de regresión que involucran al módulo de elasticidad, la tensión de rotura y la densidad. Únicamente la gráfica que relaciona el módulo de elasticidad con la densidad ha ofrecido buenos valores de correlación, $R^2=0,63$ (figura 5.7 y tabla 5.2). En los casos del análisis del módulo de elasticidad frente a la tensión de rotura y de la tensión de rotura frente a la densidad, los coeficientes obtenidos han sido bajísimos, 0,13 y 0,10 respectivamente, lo que indica que no se puede concluir que haya relación estadísticamente significativa entre estas variables analizadas (figuras 5.6, 5.8 y tabla 5.2).

La correlación entre la ductilidad medida en términos de deformación y en términos de energía es casi perfecta, $R^2=0,98$ (figura 5.9 y tabla 5.2). Sin embargo no existe ninguna correlación entre el módulo de elasticidad, la tensión de rotura o la densidad frente a los valores de ductilidad medidos en términos de deformación o de energía (figuras 5.10-5.15 y tabla 5.2).

5.4 Conclusiones

Se han obtenido unos valores medios para la tensión de rotura y el módulo de elasticidad de 4,20 MPa y 305,86 MPa, respectivamente.

La comparación de los valores obtenidos con los estimados por el sistema de asignación de clases resistentes de las normas UNE indica que la norma queda del lado de la seguridad cuando se estiman los valores de tensión de rotura o de densidad y queda del lado de la inseguridad cuando se estima el módulo de elasticidad.

Todas las piezas rompen con grandes ductilidades antes del fallo.

Se ha obtenido un buen coeficiente de correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad.

No existe ninguna correlación entre la tensión de rotura y la densidad ni entre la tensión de rotura y el módulo de elasticidad.

Existe una correlación prácticamente perfecta entre la ductilidad medida en términos de deformación y en términos de energía.

No existe ninguna correlación entre el módulo de elasticidad, la tensión de rotura o la densidad frente a los valores de ductilidad medidos en términos de deformación o de energía.

6 EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE MADERA DE PINO INSIGNE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA SOMETIDOS A COMPRESIÓN TRANSVERSAL A LAS FIBRAS

6.1 Introducción

En el capítulo anterior se analizó el comportamiento de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría sometidas a un esfuerzo de compresión transversal a las fibras. En este capítulo se realiza un estudio paralelo al anterior trabajando sobre piezas de madera de pino insigne de pequeña escuadría bajo el mismo tipo de esfuerzo. En la figura 6.1 se muestran algunas piezas de madera obtenidas de las mismas tablas estudiadas en distintos momentos del ensayo al que se han sometido.

Figura 6.1. Imágenes del ensayo a compresión transversal. Piezas IN3a3 e IN3b4.

6.1.1 Objetivos

De nuevo se han obtenido las propiedades mecánicas asociadas a este tipo de sollicitación, se ha comprobado qué correlaciones pueden emplearse con éxito y el ajuste de los valores obtenidos con los estimados por las normas de clasificación visual y resistente de la madera en uso. Además los resultados permiten comparar la respuesta del pino insigne frente al tipo silvestre para este tipo de esfuerzo.

También se ha elaborado una documentación completa con información detallada sobre las propiedades físicas y mecánicas de cada una de las piezas objeto de este estudio que se presenta en forma de fichas en el Anexo 4 de este documento donde, además, se encuentra una descripción gráfica de algún momento de los ensayos a los que se les ha sometido así como los diagramas tensión - deformación resultado de los mismos.

6.1.2 Materiales y métodos

Se han ensayado a compresión en sentido transversal a la fibra y hasta rotura 10 piezas de madera de pino insigne de pequeña escuadría de unas dimensiones aproximadas de 26 mm de espesor, 150 mm de anchura y 160 mm de altura.

Los ensayos se han realizado en la prensa de ensayos universal, marca IBERTEST, modelo MIB-60/AM, que utiliza el software Wintest 32, controlando el desplazamiento a una velocidad de 0,3 mm/min. Todas las tablas ensayadas son ME1 y según la clasificación visual de UNE 56544 (AENOR, 2011b), les corresponde una clasificación mecánica C24.

6.2 Resultados obtenidos

Después del ensayo a compresión hasta rotura se han obtenido los siguientes resultados: Tensión de rotura, módulo de elasticidad, deformación máxima (correspondiente a la tensión de rotura), deformación última (correspondiente a la del agotamiento del material), densidad de energía de

deformación máxima (área encerrada por el diagrama tensión deformación hasta el punto de tensión máxima), densidad de energía de deformación última (área total encerrada por el diagrama tensión deformación), ductilidad en términos de deformación (obtenida como el cociente entre la deformación última y la deformación máxima), ductilidad en términos de densidad de energía (obtenida como el cociente entre la densidad de energía última y la densidad de energía máxima) y densidad.

En la tabla 6.1 se indican los valores obtenidos para cada una de las piezas ensayadas junto a los correspondientes valores medios para cada propiedad obtenida.

Tabla 6.1. Valores obtenidos en el ensayo de compresión transversal. Piezas de pino insigne.

Probeta	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	$\epsilon_{\text{máx}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	A _{máx}	A _u	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$	A _u /A _{máx}	ρ (Kg/m ³)
IN1b4	8,98	0,0266	0,0562	444,47	0,14	0,39	2,11	2,70	585,56
IN2a3	8,28	0,0318	0,0628	527,94	0,19	0,43	1,97	2,28	618,30
IN2a4	8,24	0,0286	0,0437	502,60	0,16	0,28	1,53	1,72	615,55
IN2b3	6,24	0,0176	0,0716	428,09	0,06	0,51	4,07	7,97	598,32
IN3a3	6,13	0,0335	0,0644	300,47	0,14	0,31	1,92	2,27	536,70
IN3b3	7,56	0,0304	0,0443	412,58	0,15	0,25	1,46	1,67	579,79
IN3b4	7,56	0,0292	0,0544	391,57	0,14	0,30	1,86	2,14	568,63
IN4a2	7,18	0,0291	0,0523	448,09	0,15	0,30	1,80	2,02	599,73
IN4b3	8,48	0,0366	0,0603	411,54	0,21	0,39	1,65	1,85	591,94
IN4b4	5,68	0,0270	0,0424	324,90	0,10	0,19	1,57	1,82	569,76
$\bar{x}$	7,43	0,0290	0,0552	419,23	0,15	0,34	1,99	2,64	586,43
D.T.	1,11	0,0050	0,0098	70,07	0,04	0,10	0,76	1,90	24,32
C.V.	6,68	5,7732	5,6435	5,98	3,51	3,53	2,63	1,39	24,11

6.3 Análisis y discusión de los resultados

6.3.1 Tensiones de rotura y módulos de elasticidad

La media de los valores de la tensión de rotura ha sido de 7,43 MPa y la media de los módulos de elasticidad de 419,23 MPa. Si se comparan estos

valores con los estimados por la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016) en función de la clasificación visual de la madera (2,5 MPa para la tensión de rotura y 370 MPa para el módulo de elasticidad) se puede afirmar que los valores estimados por el conjunto de normas UNE utilizadas quedan muy del lado de la seguridad cuando se estima la resistencia a rotura. En este punto hay que tener en cuenta que las normas predicen un valor característico y este valor se ha comparado con el valor medio obtenido experimentalmente. Aun así el menor valor de tensión de rotura obtenido en los ensayos ha sido de 5,68 MPa, que supera en más del doble al estimado por las normas. Si se analizan los valores del módulo de elasticidad perpendicular a la fibra, se puede afirmar que de nuevo los valores estimados por las normas UNE quedan un 13% del lado de la seguridad.

Los ensayos sobre piezas de pino silvestre han ofrecido los valores de 4,2 MPa para la tensión de rotura y de 305,86 MPa para el módulo de elasticidad. La comparación de estos valores con los de pino insignie permite afirmar que las piezas de pino insignie ensayadas obtienen unos resultados de resistencia en compresión transversal a las fibras muy superiores a las de pino silvestre (77% superior) y unos valores de módulo de elasticidad en compresión transversal también superiores (37% superior).

La diferencia entre los valores medios obtenidos en los ensayos y los estimados por las normas UNE han sido de 29,7% para la tensión de rotura y 13% para el módulo de elasticidad. En el caso de la experimentación realizada sobre pino silvestre estas diferencias son del 61% (la tensión de rotura experimental es superior a la estimada) y 24% (el módulo de elasticidad estimado es superior al experimental). Estos resultados permiten afirmar que, para este tipo de sollicitación, la estimación de la norma para la tensión de rotura en el caso de madera de pino silvestre es mejor que para el pino insignie y sin embargo cuando se estima el módulo de elasticidad sucede lo contrario.

6.3.2 Diagramas tensión deformación y forma de rotura

En la figura 6.2 se muestra el diagrama tensión deformación de la pieza IN1b4.

Figura 6.2. Diagrama tensión deformación de la pieza IN1b4.

Este diagrama se puede tomar como tipo del comportamiento de un conjunto de las piezas ensayadas. En el primer tramo del diagrama lineal se ha calculado el módulo de elasticidad. Posteriormente el diagrama pierde la linealidad y la rigidez, alcanzando un máximo relativo para una deformación de un 26,6‰. La carga máxima de ensayo se alcanza después de un pequeño escalón. Posteriormente la carga necesaria para seguir deformando la probeta disminuye de forma importante hasta la rotura que se produce para deformaciones del 56,2‰. Esto supone una ductilidad de la pieza de 2,12 medida en términos de deformaciones o de 2,70 medida en términos de densidad de energía de deformación.

En la figura 6.3 puede comprobarse el estado de la pieza después de la rotura. La pieza rompe por división en dos partes siguiendo una superficie coincidente con un anillo de crecimiento.

Figura 6.3. Fotografía de la pieza IN1b4 después de la rotura.

En otros casos la rotura se produce sin manifestarse escalones en el diagrama tensión deformación. Así por ejemplo en la figura 6.4 se muestra el diagrama tensión deformación hasta rotura de la pieza IN2a3.

Figura 6.4. Diagrama tensión deformación de la pieza IN2a3.

Puede apreciarse como el comportamiento de la pieza es más regular que en el caso anterior, con una línea más suave después de alcanzar la carga máxima y hasta llegar a la rotura. En la figura 6.5 se muestra una fotografía del momento en el que se produce el fallo de la pieza.

Figura 6.5. Fotografía de la pieza IN2a3 antes de la rotura.

En este caso los valores de ductilidad medidos en términos de deformaciones (1,97) o de energías (2,28) son algo inferiores a los anteriores.

6.3.3 Correlaciones entre las variables mecánicas

A continuación se han obtenido las correlaciones entre las propiedades mecánicas estudiadas y sus correspondientes coeficientes. Se han analizado las correlaciones entre las siguientes variables: Módulo de elasticidad y tensión de rotura; módulo de elasticidad y densidad; tensión de rotura y densidad; ductilidad en términos de deformación y ductilidad en términos de energía; módulo de elasticidad y ductilidad en términos de deformación; módulo de elasticidad y ductilidad en términos de energía; tensión de rotura y ductilidad en términos de deformación; tensión de rotura y ductilidad en términos de energía; densidad y ductilidad en términos de deformación; densidad y ductilidad en términos de energía.

En las figuras 6.6 - 6.15 se muestran los gráficos obtenidos y en la tabla 6.2 se indica un resumen con las ecuaciones de las rectas de regresión y los coeficientes de correlación correspondientes.

Figura 6.6. Correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura.

Figura 6.7. Correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad.

Figura 6.8. Correlación entre la tensión de rotura y la densidad.

Figura 6.9. Correlación entre la ductilidad en términos de deformación y la ductilidad en términos de energía.

Figura 6.10. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 6.11. Correlación entre el módulo de elasticidad y la ductilidad en términos de energía.

Figura 6.12. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 6.13. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de energía.

Figura 6.14. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 6.15. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de energía.

Tabla 6.2. Ecuaciones de las rectas de regresión y el coeficiente de correlación.

Variables	Recta de Regresión	R	R ²
$E - \sigma_{\text{máx}}$	$E = 43,817 \sigma_{\text{máx}} + 93,542$	0,696	0,484
$E - \rho$	$E = 2,692 \rho - 1159,246$	0,934	0,873
$\sigma_{\text{máx}} - \rho$	$\sigma_{\text{máx}} = 0,024 \rho - 6,683$	0,526	0,277
$\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} - A_u / A_{\text{máx}}$	$\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} = 0,397 A_u / A_{\text{máx}} + 0,945$	0,992	0,984
$E - \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}}$	$E = 6,385 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} + 406,494$	0,069	0,005
$E - A_u / A_{\text{máx}}$	$E = 1,929 A_u / A_{\text{máx}} + 414,127$	0,052	0,003
$\sigma_{\text{máx}} - \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}}$	$\sigma_{\text{máx}} = -0,433 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} + 8,296$	-0,295	0,087
$\sigma_{\text{máx}} - A_u / A_{\text{máx}}$	$\sigma_{\text{máx}} = -0,193 A_u / A_{\text{máx}} + 7,943$	-0,329	0,108
$\rho - \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}}$	$\rho = 4,317 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx}} + 577,818$	0,135	0,018
$\rho - A_u / A_{\text{máx}}$	$\rho = 1,845 A_u / A_{\text{máx}} + 581,55$	0,144	0,021

El análisis de las figuras 6.6 - 6.15 y de la tabla 6.2 indica que, tal como ocurría en el capítulo anterior con las piezas de pino silvestre sometidas a la misma sollicitación, la mejor correlación se obtiene cuando se relacionan las densidades de energía de deformación en términos de energía y en términos de deformación ($R^2 = 0,98$).

La correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad también es muy alta ($R^2 = 0,87$). En el caso del pino silvestre también se obtuvo un buen resultado en esta correlación, aunque inferior ($R^2 = 0,63$).

Los resultados para la correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura se han mantenido en valores medios, con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,48$, muy superiores al valor $R^2 = 0,133$ obtenido con madera de pino silvestre, que indica que no existía ninguna relación.

Para el resto de correlaciones, los resultados han sido similares a los obtenidos con pino silvestre, se han obtenido unos coeficientes de correlación bajísimos, por lo que no se puede concluir que exista relación estadísticamente significativa entre las variables estudiadas.

6.4 Conclusiones

Los valores estimados por el conjunto de normas UNE utilizadas quedan extraordinariamente del lado de la seguridad cuando se estima la resistencia a rotura. Cuando se estima el valor del módulo de elasticidad, predicen valores un 13% por debajo de los experimentales.

Las piezas de pino insignie ensayadas obtienen unos resultados de resistencia en compresión transversal a las fibras muy superiores a las de pino silvestre (77% superior) y unos valores de módulo de elasticidad en compresión transversal también superiores (37% superior).

La mejor correlación se obtiene cuando se relacionan las densidades de energía de deformación en términos de energía y en términos de deformación. Esto también sucedía con las piezas de pino silvestre.

La correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad también es muy alta ($R^2 = 0,87$).

La correlación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura se han mantenido en valores medios ($R^2 = 0,48$).

Para el resto de correlaciones, no se puede concluir que exista relación estadísticamente significativa entre las variables estudiadas.

7 EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA SOMETIDOS A COMPRESIÓN LONGITUDINAL A LAS FIBRAS

7.1 Introducción

En el capítulo 4 de esta Tesis Doctoral se ha realizado un estudio acerca del comportamiento de piezas de madera de pino silvestre de pequeña escuadría, habitualmente empleadas en PC, MAE y construcciones entramadas de madera para viviendas unifamiliares. En este capítulo el estudio se realiza sobre piezas de gran escuadría. Los resultados obtenidos permitirán caracterizar mecánicamente este tipo de piezas y compararlos con los de los obtenidos en piezas de pequeña escuadría. Se pueden encontrar numerosos ejemplos de piezas de madera de pino silvestre de gran escuadría utilizados en la construcción de muros entramados de madera en Madrid de la segunda mitad del siglo XIX (figura 7.1).

Figura 7.1. Muro entramado de madera de la segunda mitad del siglo XIX en Madrid.

7.1.1 Objetivos

En este capítulo se analiza el comportamiento a compresión de piezas de madera de pino silvestre de gran escuadría sometidas a un esfuerzo de compresión longitudinal a las fibras. Se han obtenido las propiedades mecánicas asociadas a este tipo de sollicitación, se ha obtenido el módulo de elasticidad dinámico mediante el empleo de la velocidad de ultrasonidos, se ha comprobado qué correlaciones pueden emplearse con éxito y el ajuste de los valores obtenidos con los estimados por las normas de clasificación visual y resistente de la madera en uso. Finalmente, los resultados obtenidos se han comparado con los de piezas de pequeña escuadría.

También se ha elaborado una documentación completa con información detallada sobre las propiedades físicas y mecánicas de cada una de las piezas objeto de este estudio que se presenta en forma de fichas en el Anexo 5 de este documento donde, además, se encuentra una descripción gráfica de algún momento de los ensayos a los que se les ha sometido así como los diagramas tensión - deformación resultado de los mismos.

7.1.2 Materiales y métodos

Se han ensayado a compresión en sentido longitudinal a la fibra y hasta rotura 29 piezas de madera de pino silvestre de gran escuadría de unas dimensiones aproximadas de 153 x 153 mm² de sección y 300 mm de altura.

Los ensayos se han realizado en la prensa de ensayos universal, marca IBERTEST, modelo MIB-60/AM, que utiliza el software Wintest 32, controlando el desplazamiento a una velocidad de 0,3 mm/min. Todas las piezas ensayadas son MEG según la clasificación visual de UNE 56544 (AENOR, 2011b) y les corresponde una clasificación mecánica C22 según UNE-EN 1912 (AENOR, 2012).

Previamente a los ensayos se ha obtenido la densidad de las piezas y la velocidad de paso de ultrasonidos utilizando el equipo Ibertest Ultrasonic Tester E46 dotado de dos palpadores (figura 7.2).

Figura 7.2. Distintos momentos en el transcurso de los ensayos.

7.2 Resultados obtenidos

Después del ensayo de ultrasonidos y de compresión hasta rotura se han obtenido los siguientes resultados: Tensión de rotura, módulo de elasticidad estático, deformación máxima (correspondiente a la tensión de rotura), deformación última (correspondiente a la del agotamiento del material), densidad de energía de deformación máxima (área encerrada por el diagrama tensión deformación hasta el punto de tensión máxima), densidad de energía de deformación última (área total encerrada por el diagrama tensión deformación), ductilidad en términos de deformación (obtenida como el cociente entre la deformación última y la deformación máxima), ductilidad en términos de densidad de energía (obtenida como el cociente entre la densidad de energía última y la densidad de energía máxima), densidad y módulo de elasticidad dinámico.

En la tabla 7.1 se indican los valores obtenidos para cada una de las piezas ensayadas junto a los valores medios para cada propiedad obtenida.

Tabla 7.1. Valores obtenidos en el ensayo de compresión longitudinal y de ultrasonidos. Gran escuadría.

P.	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	E_d (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (mm ²)	A_u (mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx.}}$	$A_u/A_{\text{máx.}}$	ρ (Kg/m ³)
A1	46,4	0,0086	0,068	3866	12227	0,2457	2,6202	7,8997	10,6626	532,5
A2	51,1	0,0074	0,040	3796	12936	0,2152	1,6484	5,3973	7,6596	679,4
A3	55,5	0,0069	0,053	4164	12622	0,2270	2,4072	7,6400	10,6035	604,6
A4	52,3	0,0047	0,049	4226	10889	0,1408	2,1179	10,3376	15,0412	505,7
A5	50,1	0,0039	0,017	4104	16664	0,0895	0,6696	4,4620	7,4794	553,2
A6	48,2	0,0057	0,015	4764	16310	0,1548	0,5506	2,6711	3,5571	522,2
A7	64,6	0,0050	0,024	4329	17648	0,1572	1,2426	4,9429	7,9041	560,6
A8	49,2	0,0069	0,133	4147	13163	0,1832	5,5401	19,4267	30,2480	579,2
A9	48,4	0,0074	0,127	3998	12056	0,2043	5,1817	17,2231	25,3679	514,8
A10	63,1	0,0072	0,042	4471	14284	0,2316	2,1377	5,8662	9,2285	521,7
A11	58,6	0,0049	0,029	4536	15719	0,1516	1,3575	5,8518	8,9531	501,4
A12	63,8	0,0052	0,026	4582	15538	0,1767	1,2929	4,9512	7,3165	518,9
A15	62,6	0,0049	0,068	4174	16298	0,1524	3,5334	13,9013	23,1902	514,5
A16	53,0	0,0068	0,065	4219	13100	0,1995	2,8362	9,4435	14,2178	598,0
A17	68,9	0,0039	0,133	5215	15638	0,1390	7,8201	34,5580	56,2592	516,7
A18	68,9	0,0066	0,018	5203	18722	0,2587	0,9189	2,6810	3,5521	596,5
A19	57,5	0,0056	0,021	4949	13934	0,1865	0,9341	3,7238	5,0086	475,9
A20	59,8	0,0067	0,013	4986	15402	0,2454	0,5780	1,9634	2,3556	529,4
A22	57,2	0,0077	0,104	4348	12319	0,2504	5,0064	13,6022	19,9971	639,9
A23	62,0	0,0070	0,058	4135	10908	0,2631	3,0000	8,3097	11,4016	497,3
A24	68,4	0,0065	0,034	5086	14892	0,2332	1,8708	5,2677	8,0232	513,3
A25	77,0	0,0074	0,134	5326	16398	0,3264	8,7086	18,0525	26,6788	555,0
A27	55,8	0,0045	0,071	4632	11266	0,1363	3,3055	15,5640	24,2538	503,4
A28	72,7	0,0053	0,041	5279	16033	0,2050	2,4335	7,6970	11,8699	524,6
A29	50,1	0,0099	0,082	3962	10086	0,2799	3,3827	8,2917	12,0871	584,1
$\bar{x}$	58,6	0,0063	0,059	4500	14202	0,2021	2,8438	9,5890	14,5167	545,7
D.T.	8,4	0,0015	0,040	477	2322	0,0549	2,1509	7,2349	11,6916	49,0
C.V.	7,0	4,2310	1,472	9	6	3,6790	1,3221	1,3254	1,2416	11,1

7.3 Análisis y discusión de los resultados

7.3.1 Tensiones de rotura y módulos de elasticidad

La media de los valores de la tensión de rotura ha sido de 58,62 MPa y la media de los módulos de elasticidad de 4500 MPa. Si se comparan estos valores con los estimados por la norma UNE-EN 338 (AENOR, 2016) en función de la clasificación visual de la madera (20 MPa para la tensión de rotura y 10000 MPa para el módulo de elasticidad) se puede afirmar que la norma es conservadora cuando se trata de estimar los valores de tensión de rotura y queda del lado de la inseguridad cuando estima los valores del módulo de elasticidad. En este punto hay que tener en cuenta que el valor de la tensión de rotura estimado por la norma es un valor característico, que se ha comparado con un valor medio experimental. Para la densidad, se ha obtenido experimentalmente un valor medio de 546 kg/m³, mientras que la norma predice un valor medio de 410 kg/ m³, un 33% inferior.

7.3.2 Diagramas tensión deformación y forma de rotura

En la figura 7.3 se muestra el diagrama tensión deformación de la pieza A3.

Figura 7.3. Diagrama tensión deformación de la pieza A3.

Este diagrama es representativo del comportamiento de todas las piezas ensayadas. El diagrama comienza con un primer tramo muy lineal hasta alcanzar la tensión máxima. Posteriormente la pieza sigue deformándose para cargas sucesivamente menores hasta la rotura que se produce de una forma muy dúctil tanto en deformaciones como en densidad de energía de deformación. El mecanismo de colapso se produce por un pandeo localizado de las fibras, que sucede después de alcanzar la máxima carga de ensayo, que se produce simultáneamente a la aparición de planos de deslizamiento con ángulos comprendidos entre 0 y 30°. En la figura 7.4 puede comprobarse la pieza antes del ensayo y el estado de deformación de la pieza después de la rotura.

Figura 7.4. Fotografía de la pieza A3 antes y después de la rotura.

La existencia de nudos en las piezas no modifica significativamente la forma del diagrama o los valores alcanzados por las propiedades mecánicas analizadas pero si la forma de rotura. Cuando existe un nudo en la pieza la rotura se inicia en la sección correspondiente al nudo. En las figuras 7.5 y 7.6 puede observarse el estado de las piezas A27 y A29 antes y después de la rotura. En ambos casos el plano de deslizamiento se produce en la sección transversal donde está situado el nudo. También puede comprobarse como se produce un desplazamiento horizontal de las fibras que es máximo en la sección del nudo.

Figura 7.5. Fotografía de la pieza A27 antes y después de la rotura.

Figura 7.6. Fotografía de la pieza A29 antes y después de la rotura.

7.3.3 Correlaciones entre las variables mecánicas

A continuación se han obtenido las correlaciones entre las propiedades mecánicas estudiadas y sus correspondientes coeficientes. Se han analizado las correlaciones entre las siguientes variables: Módulo de elasticidad estático y tensión de rotura; módulo de elasticidad estático y densidad; tensión de rotura y densidad; ductilidad en términos de deformación y ductilidad en términos de energía; módulo de elasticidad estático y ductilidad en términos de

deformación; módulo de elasticidad estático y ductilidad en términos de energía; tensión de rotura y ductilidad en términos de deformación; tensión de rotura y ductilidad en términos de energía; módulo de elasticidad estático y módulo de elasticidad dinámico; módulo de elasticidad dinámico y tensión de rotura; densidad y módulo de elasticidad dinámico; módulo de elasticidad dinámico y ductilidad en términos de deformación; módulo de elasticidad dinámico y ductilidad en términos de energía; densidad y módulo de elasticidad dinámico; densidad y ductilidad en términos de deformación; densidad y ductilidad en términos de energía.

En las figuras 7.7 - 7.21 se muestran los gráficos obtenidos y en la tabla 7.2 se indica un resumen con las ecuaciones de las rectas de regresión y el coeficiente de correlación.

Figura 7.7. Correlación entre el módulo de elasticidad estático y la tensión de rotura.

Figura 7.8. Correlación entre el módulo de elasticidad estático y la densidad.

Figura 7.9. Correlación entre la tensión de rotura y la densidad.

Figura 7.10. Correlación entre la ductilidad en términos de deformación y la ductilidad en términos de energía.

Figura 7.11. Correlación entre el módulo de elasticidad estático y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 7.12. Correlación entre el módulo de elasticidad estático y la ductilidad en términos de energía.

Figura 7.13. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 7.14. Correlación entre la tensión de rotura y la ductilidad en términos de energía.

Figura 7.15. Correlación entre el módulo de elasticidad estático y el módulo de elasticidad dinámico.

Figura 7.16. Correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la tensión de rotura.

Figura 7.17. Correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la ductilidad en términos de deformación

Figura 7.18. Correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la ductilidad en términos de energía

Figura 7.19. Correlación entre la densidad y el módulo de elasticidad dinámico.

Figura 7.20. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de deformación.

Figura 7.21. Correlación entre la densidad y la ductilidad en términos de energía.

Tabla 7.2. Ecuaciones de las rectas de regresión y coeficiente de correlación.

Variables	Recta de Regresión	R	R ²
$E_s - E_d$	$E_s = 0,119 E_d + 2805,642$	0,581	0,338
$E_s - \sigma_{\text{máx}}$	$E_s = 43,621 \sigma_{\text{máx}} + 1942,815$	0,770	0,593
$E_s - \rho$	$E_s = -3,215 \rho + 6254,132$	-0,331	0,109
$\sigma_{\text{máx}} - \rho$	$\sigma_{\text{máx}} = -0,032 \rho + 75,945$	-0,185	0,034
$E_s - A_u / A_{\text{máx.}}$	$E_s = 4,306 A_u / A_{\text{máx.}} + 4437,358$	0,106	0,011
$\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx.}} - A_u / A_{\text{máx.}}$	$\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx.}} = 0,617 A_u / A_{\text{máx.}} + 0,63$	0,997	0,995
$\sigma_{\text{máx}} - \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx.}}$	$\sigma_{\text{máx}} = 0,163 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx.}} + 57,058$	0,140	0,020
$\rho - E_d$	$\rho = -0,001 E_d + 566,072$	-0,068	0,005
$\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx.}} - E_d$	$\epsilon_u / \epsilon_{\text{máx.}} = -0,001 E_d + 17,265$	-0,173	0,030
$A_u / A_{\text{máx.}} - E_d$	$A_u / A_{\text{máx.}} = -0,001 E_d + 23,854$	-0,131	0,017
$\sigma_{\text{máx}} - A_u / A_{\text{máx.}}$	$\sigma_{\text{máx}} = 0,114 A_u / A_{\text{máx.}} + 56,972$	0,158	0,025
$\rho - \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx.}}$	$\rho = 0,235 \epsilon_u / \epsilon_{\text{máx.}} + 535,903$	0,043	0,002
$\rho - A_u / A_{\text{máx.}}$	$\rho = 0,235 A_u / A_{\text{máx.}} + 535,903$	0,043	0,002

El análisis de las figuras 7.7 - 7.21 y de la tabla 7.2 indican que no se puede afirmar que exista correlación estadísticamente significativa entre la densidad y cualquiera de las variables estudiadas.

Al igual que sucedía con las piezas de pequeña escuadría, la mejor correlación se da entre la ductilidad evaluada en términos de deformación y la

ductilidad evaluada en términos de energía de deformación, con un coeficiente de determinación altísimo ($R^2=0,99$).

Existe una buena correlación entre el módulo de elasticidad estático y la tensión de rotura ($R^2=0,59$).

El coeficiente de determinación obtenido entre el módulo de elasticidad estático y la densidad es muy bajo, además la recta de regresión posee pendiente negativa, lo que indica que a medida que aumenta el módulo de elasticidad estático, disminuye la densidad.

El estudio realizado con el módulo de elasticidad dinámico indica que únicamente existe alguna relación con el módulo de elasticidad estático ($R^2 = 0,34$) y con la tensión de rotura ($R^2 = 0,31$). Con el resto de propiedades analizadas las correlaciones son nulas.

7.4 Conclusiones

El sistema establecido por las normas UNE para estimar propiedades mecánicas de la madera es muy conservadora cuando se trata de estimar los valores de tensión de rotura y queda muy del lado de la inseguridad cuando estima los valores del módulo de elasticidad para este tipo de sollicitación y esta especie de madera de pequeña escuadría.

No se puede afirmar que exista correlación estadísticamente significativa entre la densidad y cualquiera de las variables estudiadas.

Existe una correlación excelente entre la ductilidad evaluada en términos de deformación y la ductilidad evaluada en términos de energía de deformación.

Existe una buena correlación entre el módulo de elasticidad estático y la tensión de rotura.

El estudio realizado con el módulo de elasticidad dinámico indica que únicamente existe alguna relación con el módulo de elasticidad estático ($R^2 = 0,34$) y con la tensión de rotura ($R^2 = 0,31$).

8 CONCLUSIONES

En cuanto a los ensayos realizados en las tablas de madera de pino silvestre ensayadas a flexión:

- Solo el 61% de las tablas podrían emplearse para SPPB (clase resistente igual o superior a C16).
- Existe relación entre la clasificación comercial y la clasificación visual para las piezas analizadas, observando que ésta última mejora cuando únicamente se considera el tercio central de las mismas.
- Los valores estimados por la norma quedan del lado de la seguridad para todas las clasificaciones.
- La clase ME1 obtiene valores de módulo de elasticidad superiores al indicado por la norma para la clase C27.
- El módulo de elasticidad de la clase comercial CC es superior al de la clase resistente C27.
- Existe una buena correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad para todas las tablas ensayadas tomadas en conjunto.
- Todas las tablas con un espesor igual o superior a 27 mm, han sido capaces de superar el requisito de desplazamiento de la norma UNE-EN 13374 (AENOR, 2013).
- El análisis de las microdeformaciones experimentadas bajo carga estática, en cara superior e inferior, verifican un comportamiento elástico y lineal de las tablas.
- En los ensayos de impacto se comprueba la existencia de una relación estadísticamente significativa entre la rigidez de pieza y los desplazamientos experimentados.
- Puede emplearse la Hipótesis de Rayleigh para calcular barandillas de seguridad compuestas con tablas de madera en sus elementos horizontales.

- Para impactos de 120J y 180J se han obtenido, en los elementos que impactan, aceleraciones superiores a las que puede asumir el cuerpo humano sin experimentar graves lesiones.

Las piezas de pino insigne ensayadas ofrecen resultados de resistencia y módulo de elasticidad en compresión transversal a las fibras muy superiores a las de pino silvestre. Los valores estimados por el conjunto de normas UNE utilizadas, en ambos casos, quedan del lado de la seguridad cuando se estima la resistencia a rotura y del lado de la inseguridad cuando se trata del módulo de elasticidad.

La mejor correlación en compresión transversal a las fibras, en ambas especies ensayadas, ocurre cuando se relacionan las densidades de energía de deformación en términos de energía y en términos de deformación. También se ha encontrado una buena correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad.

Las piezas de pino silvestre de gran escuadría sometidas a compresión longitudinal presentan un comportamiento mucho más dúctil que las de pequeña escuadría, debido a la mayor esbeltez de estas últimas.

9 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A tenor de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, sería interesante conocer los valores de respuesta ante los mismos impactos de otras especies de coníferas, pertenecientes a otras clasificaciones resistentes, también utilizadas en el sector.

Debido a la ubicación habitual de este tipo de protecciones, expuestas a las inclemencias atmosféricas, se hace necesario un conocimiento más profundo de su incidencia en las propiedades resistentes ante los distintos grados de deterioro posibles, considerando también el comportamiento de las barandillas de madera sometidas a ciclos de envejecimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. (1990). *Norma UNE 23727:1990. Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Clasificación de los materiales utilizados en la construcción*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (1996a). *Norma UNE-EN 408:1996. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (1996b). *Norma UNE-EN 518:1996. Madera estructural. Clasificación. Requisitos de las normas de clasificación visual resistente*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (1997). *Norma UNE-EN 1310:1997. Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2000). *Norma UNE-EN 1611-1:2000. Madera aserrada. Clasificación por el aspecto de la madera de coníferas. Parte 1: Piceas, abetos, pinos y abeto de Douglas y alerce europeos*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2004). *Norma UNE-EN 408:2004. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2006). *Norma UNE-EN 14081-1:2006. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2009). *Norma UNE-EN 14081-4:2009. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por resistencia. Parte 4: Equipo de clasificación. Equipo de clasificación con sistema controlado automáticamente*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2010a). *Norma UNE-EN 14081-2:2010. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 2: Clasificación mecánica. Requisitos complementarios para el ensayo inicial de tipo*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2010b). *Norma UNE-EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2011a). *Norma UNE-EN 408:2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2011b). *Norma UNE 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. Asociación Española de Normalización.

- AENOR. (2012). *Norma UNE-EN 1912:2012 Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2013). *Norma UNE-EN 13374:2013. Sistemas provisionales de protección de borde. Especificaciones del producto. Métodos de ensayo*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2014). *Norma UNE-EN 336:2014. Madera estructural. Medidas y tolerancias*. Asociación Española de Normalización.
- AENOR. (2016). *Norma UNE-EN 338:2016. Madera estructural. Clases resistentes*. Asociación Española de Normalización.
- Argüelles Álvarez, R. (1969). *Cálculo de estructuras de madera*. (S.I.) : Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM).
- Argüelles Álvarez, R., & Arriaga Martitegui, F. (1988). *Curso de diseño y cálculo de estructuras de madera*. (S.I.) : Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
- Arriaga, F., Esteban, M., Relea, E., & Relea, E. (2005). Evaluación de la capacidad portante de piezas de gruesa escuadría de madera de conífera en estructuras existentes. *Materiales de Construcción*, 55(280), 43-52.
- Baño, V., Argüelles-Bustillo, R., Regueira, R., Guaita, M., & Guaita, M. (2012). Determinación de la curva tensión-deformación en madera de 'Pinus sylvestris' L. para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos. *Materiales de Construcción*, 62(306), 269-284. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.64110>
- Barrett, J. D. (1974). Effect of size on tension perpendicular- to-grain strength of douglas-fir. *Wood and Fiber*, 6(2), 126-143.
- Basterra, L.A.; Acuña, L.; Casado, M.; Ramón-Cueto, G.; López, G. (2007). Técnicas no destructivas y pseudo-no destructivas aplicadas a la madera estructural. *Tecnología de la rehabilitación y del patrimonio construido (REHABEND 2007)*. Santander, octubre 2007.
- Basterra, L.A.; López, G.; Ramón-Cueto, G.; Acuña, L.; Casado, M. (2008). Diagnóstico e inspección in situ mediante técnicas no destructivas de la armadura de la nave central de la catedral de Segovia (España). *Tecnología de la rehabilitación y del patrimonio construido (REHABEND 2008)*. Valencia, octubre de 2008.
- Beall, F. C. (2002). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology*, 36(3), 197-212. <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0138-4>
- Bengtsson, C. (2000). Stiffness of spruce wood - Influence of moisture conditions. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 58(5), 344-352. <https://doi.org/10.1007/s001070050443>
- BOE. *Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales*. (1995).

- Boström, L. (1994). *Machine strength grading: comparison of four different systems*. (S.I.) : Swedish National Testing and Research Institute.
- Boström, L. (1999). 1st international RILEM symposium on timber engineering: Stockholm, Sweden, september 13-14, 1999. Dans *Proc. 1st RILEM Symposium on Timber Engineering*. (S.I.) : RILEM publications.
- Bucur, V. (1984). *Ondes ultrasonores dans le bois: Caractérisation mécanique et qualité de certaines essences de bois Ultrasonic waves in wood: mechanical characterization and quality of certain wood species*. Institut Supérieur des Matériaux et de la Construction Mécanique, Saint-Ouen, France.
- Bucur, V., & Chivers, R. C. (1991). Acoustic Properties and Anisotropy of Some Australian Wood Species. *Acoustica*, 75, 69-74.
- Burmester, A. (1965). Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 23(6), 227-236. <https://doi.org/10.1007/BF02611075>
- Cai, Z., Ross, R., Hunt, M., & Soltis, L. (2002). Pilot study to examine use of transverse vibration nondestructive evaluation for assessing floor systems. *Forest products journal*.
- Chrestin, H. & Boström, L. (1997). The influence if timber origin on machine strength grading yield. *Proc. International IUFRO S 5.02 Timber Engineering Conference*, Copenhagen, Denmark.
- Dackermann, U., Crews, K., Kasal, B., Li, J., Riggio, M., Rinn, F., & Tannert, T. (2014). In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and Structures*, 47(5), 787-803. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0095-4>
- Dahlblom, O., Persson, K., Ormarsson, S., & Petersson, H. (1999). Stiffness and shape stability analysis of sawn timber based on experimentally found variations of wood properties.
- de Oliveira, F. G. R., Candian, M., Lucchette, F. F., Luis Salgon, J., & Sales, A. (2005). *A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (Goupia glabra)*. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.06.002>
- Fernández-Golfín, J. (1998). Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56544 Mechanical, 48(c).
- Fernández-Golfín, J., GUTIÉRREZ, A., & BAONZA, M. (2000). Caracterización de la madera de Pinus nigra subsp. salzmannii. *Informe final del proyecto*, 2, 113.
- Foley, C. (2001). A three-dimensional paradigm of fiber orientation in timber. *Wood Science and Technology*, 35(5), 453-465. <https://doi.org/10.1007/s002260100112>

- Foslie, M. (1971). *Strength properties of Norway spruce. Part 3—strength properties of small defect free specimens.*
- Gerhards, C. (1982). Longitudinal stress waves for lumber stress grading: factors affecting applications: state of the art. *Forest Products Journal*.
- Glos, P. (1995). Strength grading. Timber engineering STEP 1. Centrum Hout, The Netherlands.
- Glos, P., & Heimeshoff, B. (1982). Möglichkeiten und Grenzen der Festigkeitssortierung von Brettlamellen für den Holzleimbau. *und Steck*, Bruderverlag, Karlsruhe (In German).
- González García, N. (2010). *Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de protección de borde*. E.U. de Arquitectura Técnica (UPM).
- Halabe, U. B., Bidigalu, G. M., Gangarao, H. V. S., Ross, R. J., Ecmpr, E., & Esrd, E. E. (1995). Nondestructive Evaluation of Green Wood Using Stress Wave and Transverse Vibration Techniques. *Materials Evaluation*, 55(9), 1013-1018.
- Hermoso, E., Fernández-Golfín, J., & Díez, R. (2002). Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica. *Forest Systems*.
- Hermoso Prieto, E. (2001). *Caracterización mecánica de la madera estructural de Pinus sylvestris L.* E.T.S.I. Montes (UPM).
- Hernandez, R., Koubaa, A., & Beaudoin, M. (2007). Selected mechanical properties of fast-growing poplar hybrid clones. *Wood and Fiber*.
- Herrero, M. E. (2003). *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- Herzig, L. (1992). *Evaluation du module d'Young de bois d'épinette par méthode ultrasonore sur carottes de sondage*. 290p.
- Hoffmeyer, P. (1984). Om konstruktionstraes styrke och styrkesortering. I Skovteknologi. Et historisk og perspektivisk strejto. *Dansk Skovforening*.
- Hoffmeyer, P. (1990). *Failure of wood as influenced by moisture and duration of load*. State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, New York.
- Hoffmeyer, P. (1995). *Strength grading adds value, Part 2 – Available technique. Testing and Evaluation of Wood. Technical Report 335 (in Danish, Norwegian and Swedish)*. Lyngby, Denmark.
- Hoffmeyer, P. (1999). Tensile strength of glulam laminations of Nordic spruce. *Proceedings of Ptec '99*.
- Ilic, J. (2003). Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. *Holz als Roh-*

und Werkstoff, 61(3), 167-172. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0367-8>

INRS. *Institut National de Recherche et de Sécurité. Fiche pratique de sécurité ED 6110. Prévention des risques de chutes de hauteur.* (2012).

INSHT. (2012). *VII Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo 2011 - Año 2012 Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.* <https://doi.org/NIPO:272-12-039-5>.

Isaksson, T. (1999). Modelling the variability of bending strength in structural timber-length and load configuration effects. *Report TVBK.*

Johansson, C. (1976). Tensile strength of glulam laminations. Chalmers University of Technology, Steel and timber structures. *Internal report no. S76:18.*

Johansson, C.-J. (1998). *Laminations for glued laminated timber: establishment of strength classes for visual strength grades and machine settings for glulam laminations of Nordic origin: a Nordic wood project.* (S.I.): Swedish National Testing and Research Institute.

Johansson, C.-J., Brundin, J., & Gruber, R. (1992). *Stress grading of Swedish and German timber: a comparison of machine stress grading and three visual grading systems.* (S.I.): Sveriges provnings- och forskningsinstitut.

Jönsson, J. (2001). Moisture induced stresses in glulam cross sections. *Konferenzbeitrag, CIB-W18/34-12-4, Venedig, Italien.*

Kollman, F., & Côté, W. (1968). Principles of wood science and technology: solid wood. *Springer-Verlag.* New York Inc.

Krause, M., Dackermann, U., & Li, J. (2015). Elastic wave modes for the assessment of structural timber: ultrasonic echo for building elements and guided waves for pole and pile structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(2), 221-249. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0087-2>

Kunesh, R. H., & Johnson, J. W. (1972). Effect of single knots on tensile strength of 2-by 8-inch Douglas-fir dimension lumber. *Forest Prod J.*

Lackner, R., & Foslie, M. (1988). *Gran fra Vestlandet–Styrke och sortiering. Norwegian Institute of Wood Technology, Report 74.*

Leijten, A. J. M., Jorissen, A. J. M., & de Leijer, B. J. C. (2012). The local bearing capacity perpendicular to grain of structural timber elements. *Construction and Building Materials*, 27(1), 54-59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.022>

Leijten, A. J. M., Larsen, H. J., & Van der Put, T. A. C. M. (2010). Structural design for compression strength perpendicular to the grain of timber beams. *Construction and Building Materials*, 24(3), 252-257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.042>

Lourenço, P. B., Feio, A. O., & Machado, J. S. (2007). Chestnut wood in compression

perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1617-1627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.011>

Madsen, B. (1992). *Structural behavior of timber*. *Structural behavior of timber*. Vancouver, Canada : Timber Engineering Ltd.

Mier, R. (2001). *Clasificación de madera aserrada estructural mediante Inteligencia Artificial: Redes Neuronales*. Proyecto final de carrera. E.T.S. Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio ambiente. Gobierno de España. (2013). *Memoria de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente en España 2013*.

Mishiro, A. (1996). Effect of density on ultrasonic velocity in wood. *Mokuzai Gakkaishi*, 42(9), 887-894.

Möhler K, Natterer J, Götz KH, H. D. (1987). *Construire en bois*. Paris : Presses polytechniques et universitaires romandes.

Oliveira, F. G., de Campos, J. A., Pletz, E., & Sales, A. (2002). Nondestructive evaluation of wood using ultrasonic technique. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 4(2), 133-139.

OPPBTP. (1984). Les équipements individuels de protection contre les chutes. *Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics*. Boulogne-Billancourt, France. Repéré à <https://www.preventionbtp.fr/>

Ormarsson, S., Chalmers tekniska högskola., & Chalmers tekniska högskola. Department of Structural Mechanics. (1999). *Numerical analysis of moisture-related distortions in sawn timber*. Dept. of Structural Mechanics, Chalmers University of Technology. Repéré à <http://publications.lib.chalmers.se/publication/816-numerical-analysis-of-moisture-related-distortions-in-sawn-timber>

Part, O. S. H. A. *Subpart M CFR 1926.500-Fall Protection for the Construction Industry* (Administration. US Department of Labor, Washington, DC.) (1998).

Persson, K. (2000). Micromechanical modelling of wood and fibre properties.

Perstoper, M. (1999). Dynamic testing of logs for prediction of timber strength. *Procs. Pacific Timber Engineering Conference (PTEC'99)*. Rotorua, New Zealand.

Rinn, F. (2004). Metodología de inspección en construcciones de madera. *CIS madera*, 12, 19-32.

Rojo y Alboreca, A. & Montero González, G. (1996). *El pino silvestre en la Sierra de Guadarrama*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (S.l.) : (s.n.).

Ross, R.J.; Brashaw, R.F.; Pellerin, R. F., & Gong, M. (1998). *Nondestructive evaluation of wood*. *Forest Prod. J.* . <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.001>

- Ruiz de la Torre, J., & Ceballos. (1979). *Árboles y arbustos de la España Peninsular*. (S.I.): Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Sección de Publicaciones.
- Sandoz, J. L. (1989). Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*, 23(1), 95-108. <https://doi.org/10.1007/BF00350611>
- Schniewind, A., & Lyon, D. (1971). Tensile strength of redwood dimension lumber. II. Prediction of strength values. *Forest Prod J.*
- Smulski, S. (1991). Relationship of stress wave-and static bending-determined properties of four northeastern hardwoods. *Wood and Fiber Science*, 23(1), 44-57.
- Steffen, A., Johansson, C.-J., & Wormuth, E.-W. (1997). Study of the relationship between flatwise and edgewise moduli of elasticity of sawn timber as a means to improve mechanical strength grading technology. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 55(2-4), 245-253. <https://doi.org/10.1007/BF02990556>
- The European Union Per Regulation. (2004). *EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*.
- Thelandersson, S., & Larsen, H. J. (2003). *Timber engineering*. (S.I.) : J. Wiley.
- Vignote Peña, S. (2014). Principales maderas de coníferas en España. Características, tecnología y aplicaciones. *Monografía (Informe Técnico) E.T.S.I. Montes (UPM)*.
- Wangaard, F. (1950). *The mechanical properties of wood*. New York : John Willey & Sons Inc.
- Wormuth, E.-W. (1993). *Study of the relation between and edgewise modulus of elasticity of sawn timber for the purpose of improving mechanical stress grading methods*. Hamburg, Germany.

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Fichas: Ensayos Estáticos a Flexión. Pino Silvestre.	203
ANEXO 2. Fichas: Compresión Longitudinal Pequeña Escuadría. Pino Silvestre.	235
ANEXO 3. Fichas: Compresión Transversal Pequeña Escuadría. Pino Silvestre.	243
ANEXO 4. Fichas: Compresión Transversal Pequeña Escuadría. Pino Insigne.	257
ANEXO 5. Fichas: Compresión Longitudinal Gran Escuadría. Pino Silvestre.	265

ANEXO 1.

Ensayos Estáticos a Flexión. Pino Silvestre

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: CC4(33)- T3

CV: R/ME-2

CR: -/C18

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	5.9
240	11.9
360	18.0
480	23.8
600	30.1

CC4(33) Diagrama carga (a tercios) - flecha

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	3.2
120	6.8
180	10.3
240	13.8
300	17.4

CC4(33) Diagrama carga (al centro) - flecha

OBSERVACIONES: Nudos en arista y gemas.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA														
TABLA: CC8(18)- T4	CV: ME-1/ME-1	CR: C27/C27												
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ														
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>20.0</td></tr><tr><td>240</td><td>40.4</td></tr><tr><td>360</td><td></td></tr><tr><td>480</td><td></td></tr><tr><td>600</td><td></td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	20.0	240	40.4	360		480		600		<div><div>CC8(18) Diagrama carga (a tercios) - flecha</div><div><p>$E = 19534 \text{ N/mm}^2$</p></div></div>	
2P (N)	f (mm)													
120	20.0													
240	40.4													
360														
480														
600														
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ														
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>11.1</td></tr><tr><td>120</td><td>22.8</td></tr><tr><td>180</td><td>34.8</td></tr><tr><td>240</td><td>49.8</td></tr><tr><td>300</td><td>59.8</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	11.1	120	22.8	180	34.8	240	49.8	300	59.8	<div><div>CC8(18) Diagrama carga (al centro) - flecha</div><div><p>$E = 19109 \text{ N/mm}^2$</p></div></div>	
P (N)	f (mm)													
60	11.1													
120	22.8													
180	34.8													
240	49.8													
300	59.8													
OBSERVACIONES:														

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA																												
TABLA: CA6(26)- T6	CV: R/R	CR:																										
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ																												
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>19.8</td></tr><tr><td>240</td><td>39.8</td></tr><tr><td>360</td><td>49.8</td></tr><tr><td>480</td><td></td></tr><tr><td>600</td><td></td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	19.8	240	39.8	360	49.8	480		600		<div><div>CA6(26) Diagrama carga (a tercios) - flecha</div><table><caption>Data for CA6(26) Diagrama carga (a tercios) - flecha</caption><thead><tr><th>f (mm)</th><th>2P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>19.8</td><td>120</td></tr><tr><td>39.8</td><td>240</td></tr><tr><td>49.8</td><td>360</td></tr></tbody></table></div>		f (mm)	2P (N)	0	0	19.8	120	39.8	240	49.8	360				
2P (N)	f (mm)																											
120	19.8																											
240	39.8																											
360	49.8																											
480																												
600																												
f (mm)	2P (N)																											
0	0																											
19.8	120																											
39.8	240																											
49.8	360																											
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ																												
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>12.3</td></tr><tr><td>120</td><td>23.2</td></tr><tr><td>180</td><td>34.6</td></tr><tr><td>240</td><td>45.6</td></tr><tr><td>300</td><td>57.6</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	12.3	120	23.2	180	34.6	240	45.6	300	57.6	<div><div>CA6(26) Diagrama carga (al centro) - flecha</div><table><caption>Data for CA6(26) Diagrama carga (al centro) - flecha</caption><thead><tr><th>f (mm)</th><th>P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>12.3</td><td>60</td></tr><tr><td>23.2</td><td>120</td></tr><tr><td>34.6</td><td>180</td></tr><tr><td>45.6</td><td>240</td></tr><tr><td>57.6</td><td>300</td></tr></tbody></table></div>		f (mm)	P (N)	0	0	12.3	60	23.2	120	34.6	180	45.6	240	57.6	300
P (N)	f (mm)																											
60	12.3																											
120	23.2																											
180	34.6																											
240	45.6																											
300	57.6																											
f (mm)	P (N)																											
0	0																											
12.3	60																											
23.2	120																											
34.6	180																											
45.6	240																											
57.6	300																											
OBSERVACIONES: Nudo pasante en canto en el tercio central.																												

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA																												
TABLA: CC1(27)- T8	CV: ME-1/ME1	CR: C27/C27																										
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ																												
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>8.0</td></tr><tr><td>240</td><td>16.0</td></tr><tr><td>360</td><td>24.2</td></tr><tr><td>480</td><td>32.0</td></tr><tr><td>600</td><td>39.9</td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	8.0	240	16.0	360	24.2	480	32.0	600	39.9	<div><div>CC1(27) Diagrama carga (a tercios) - flecha</div><table><tr><th>f (mm)</th><th>2P (N)</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>10</td><td>150</td></tr><tr><td>20</td><td>300</td></tr><tr><td>30</td><td>450</td></tr><tr><td>40</td><td>600</td></tr></table><p>E = 15188 N/mm²</p></div>		f (mm)	2P (N)	0	0	10	150	20	300	30	450	40	600		
2P (N)	f (mm)																											
120	8.0																											
240	16.0																											
360	24.2																											
480	32.0																											
600	39.9																											
f (mm)	2P (N)																											
0	0																											
10	150																											
20	300																											
30	450																											
40	600																											
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ																												
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>4.5</td></tr><tr><td>120</td><td>9.2</td></tr><tr><td>180</td><td>14.1</td></tr><tr><td>240</td><td>18.8</td></tr><tr><td>300</td><td>23.3</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	4.5	120	9.2	180	14.1	240	18.8	300	23.3	<div><div>CC1(27) Diagrama carga (al centro) - flecha</div><table><tr><th>f (mm)</th><th>P (N)</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>5</td><td>60</td></tr><tr><td>10</td><td>120</td></tr><tr><td>15</td><td>180</td></tr><tr><td>20</td><td>240</td></tr><tr><td>23.3</td><td>300</td></tr></table><p>E = 14918 N/mm²</p></div>		f (mm)	P (N)	0	0	5	60	10	120	15	180	20	240	23.3	300
P (N)	f (mm)																											
60	4.5																											
120	9.2																											
180	14.1																											
240	18.8																											
300	23.3																											
f (mm)	P (N)																											
0	0																											
5	60																											
10	120																											
15	180																											
20	240																											
23.3	300																											
OBSERVACIONES:																												

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA																												
TABLA: TA10(35)- T9	CV: ME-1/ME-1	CR: C27/C27																										
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ																												
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>5.2</td></tr><tr><td>240</td><td>11.1</td></tr><tr><td>360</td><td>16.4</td></tr><tr><td>480</td><td>21.9</td></tr><tr><td>600</td><td>27.5</td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	5.2	240	11.1	360	16.4	480	21.9	600	27.5	<div>TA10(35) Diagrama carga (a tercios) - flecha</div> <table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>120</td><td>5.2</td></tr><tr><td>240</td><td>11.1</td></tr><tr><td>360</td><td>16.4</td></tr><tr><td>480</td><td>21.9</td></tr><tr><td>600</td><td>27.5</td></tr></table>		2P (N)	f (mm)	0	0	120	5.2	240	11.1	360	16.4	480	21.9	600	27.5
2P (N)	f (mm)																											
120	5.2																											
240	11.1																											
360	16.4																											
480	21.9																											
600	27.5																											
2P (N)	f (mm)																											
0	0																											
120	5.2																											
240	11.1																											
360	16.4																											
480	21.9																											
600	27.5																											
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ																												
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>2.8</td></tr><tr><td>120</td><td>6.1</td></tr><tr><td>180</td><td>9.3</td></tr><tr><td>240</td><td>12.6</td></tr><tr><td>300</td><td>15.8</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	2.8	120	6.1	180	9.3	240	12.6	300	15.8	<div>TA10(35) Diagrama carga (al centro) - flecha</div> <table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>60</td><td>2.8</td></tr><tr><td>120</td><td>6.1</td></tr><tr><td>180</td><td>9.3</td></tr><tr><td>240</td><td>12.6</td></tr><tr><td>300</td><td>15.8</td></tr></table>		P (N)	f (mm)	0	0	60	2.8	120	6.1	180	9.3	240	12.6	300	15.8
P (N)	f (mm)																											
60	2.8																											
120	6.1																											
180	9.3																											
240	12.6																											
300	15.8																											
P (N)	f (mm)																											
0	0																											
60	2.8																											
120	6.1																											
180	9.3																											
240	12.6																											
300	15.8																											
OBSERVACIONES: Pequeñas fisuras longitudinales en tabla.																												

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: TA8(33)- T15

CV: R/R

CR:

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	6.4
240	13.0
360	19.6
480	26.8
600	33.1

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	3.9
120	7.8
180	12.0
240	15.9
300	19.9

OBSERVACIONES: Varios nudos pasantes en tabla.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA																												
TABLA: CC6(24)- T17	CV: ME-1/ME-1	CR: C27/C27																										
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ																												
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>13.3</td></tr><tr><td>240</td><td>26.5</td></tr><tr><td>360</td><td>39.3</td></tr><tr><td>480</td><td></td></tr><tr><td>600</td><td></td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	13.3	240	26.5	360	39.3	480		600		<div><div>CC6(24) Diagrama carga (a tercios) - flecha</div><table><thead><tr><th>f (mm)</th><th>2P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>13.3</td><td>120</td></tr><tr><td>26.5</td><td>240</td></tr><tr><td>39.3</td><td>360</td></tr></tbody></table></div>		f (mm)	2P (N)	0	0	13.3	120	26.5	240	39.3	360				
2P (N)	f (mm)																											
120	13.3																											
240	26.5																											
360	39.3																											
480																												
600																												
f (mm)	2P (N)																											
0	0																											
13.3	120																											
26.5	240																											
39.3	360																											
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ																												
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>7.3</td></tr><tr><td>120</td><td>15.4</td></tr><tr><td>180</td><td>23.0</td></tr><tr><td>240</td><td>30.6</td></tr><tr><td>300</td><td>38.6</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	7.3	120	15.4	180	23.0	240	30.6	300	38.6	<div><div>CC6(24) Diagrama carga (al centro) - flecha</div><table><thead><tr><th>f (mm)</th><th>P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>7.3</td><td>60</td></tr><tr><td>15.4</td><td>120</td></tr><tr><td>23.0</td><td>180</td></tr><tr><td>30.6</td><td>240</td></tr><tr><td>38.6</td><td>300</td></tr></tbody></table></div>		f (mm)	P (N)	0	0	7.3	60	15.4	120	23.0	180	30.6	240	38.6	300
P (N)	f (mm)																											
60	7.3																											
120	15.4																											
180	23.0																											
240	30.6																											
300	38.6																											
f (mm)	P (N)																											
0	0																											
7.3	60																											
15.4	120																											
23.0	180																											
30.6	240																											
38.6	300																											
OBSERVACIONES: Bolsa resina de longitudinal en tabla (admisible).																												

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: CA10(34)- T24

CV: R/ME-1

CR: -/C27

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	6.7
240	13.6
360	20.1
480	27.7
600	34.0

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	3.7
120	8.0
180	11.8
240	15.9
300	19.6

OBSERVACIONES: Varios nudos pasantes en tabla.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: CA11(35)- T26

CV: R/R

CR:

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	5.4
240	11.3
360	17.3
480	23.1
600	28.9

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	2.3
120	6.3
180	9.8
240	13.7
300	16.8

OBSERVACIONES: Varios nudos pasantes y gema en tabla.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA														
TABLA: CA9(34)- T27	CV: R/ME-1	CR: -/C27												
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ														
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>6.9</td></tr><tr><td>240</td><td>14.3</td></tr><tr><td>360</td><td>21.0</td></tr><tr><td>480</td><td>27.8</td></tr><tr><td>600</td><td>34.4</td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	6.9	240	14.3	360	21.0	480	27.8	600	34.4	<div><p>CA9(34) Diagrama carga (a tercios) - flecha</p><p>$E = 9580 \text{ N/mm}^2$</p></div>	
2P (N)	f (mm)													
120	6.9													
240	14.3													
360	21.0													
480	27.8													
600	34.4													
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ														
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>4.1</td></tr><tr><td>120</td><td>8.1</td></tr><tr><td>180</td><td>12.1</td></tr><tr><td>240</td><td>16.3</td></tr><tr><td>300</td><td>20.1</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	4.1	120	8.1	180	12.1	240	16.3	300	20.1	<div><p>CA9(34) Diagrama carga (al centro) - flecha</p><p>$E = 9419 \text{ N/mm}^2$</p></div>	
P (N)	f (mm)													
60	4.1													
120	8.1													
180	12.1													
240	16.3													
300	20.1													
OBSERVACIONES: Nudo pasante en tabla.														

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA																												
TABLA: CC7(33)- T28	CV: R/ME-1	CR:-/C27																										
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ																												
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>4.9</td></tr><tr><td>240</td><td>9.8</td></tr><tr><td>360</td><td>14.9</td></tr><tr><td>480</td><td>19.7</td></tr><tr><td>600</td><td>24.7</td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	4.9	240	9.8	360	14.9	480	19.7	600	24.7	<div><div>CC7(33) Diagrama carga (a tercios) - flecha</div><table><caption>Data for CC7(33) Diagrama carga (a tercios) - flecha</caption><thead><tr><th>f (mm)</th><th>2P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>4.9</td><td>120</td></tr><tr><td>9.8</td><td>240</td></tr><tr><td>14.9</td><td>360</td></tr><tr><td>19.7</td><td>480</td></tr><tr><td>24.7</td><td>600</td></tr></tbody></table></div>		f (mm)	2P (N)	0	0	4.9	120	9.8	240	14.9	360	19.7	480	24.7	600
2P (N)	f (mm)																											
120	4.9																											
240	9.8																											
360	14.9																											
480	19.7																											
600	24.7																											
f (mm)	2P (N)																											
0	0																											
4.9	120																											
9.8	240																											
14.9	360																											
19.7	480																											
24.7	600																											
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ																												
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>2.7</td></tr><tr><td>120</td><td>6.0</td></tr><tr><td>180</td><td>8.6</td></tr><tr><td>240</td><td>11.5</td></tr><tr><td>300</td><td>14.4</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	2.7	120	6.0	180	8.6	240	11.5	300	14.4	<div><div>CC7(33) Diagrama carga (al centro) - flecha</div><table><caption>Data for CC7(33) Diagrama carga (al centro) - flecha</caption><thead><tr><th>f (mm)</th><th>P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>2.7</td><td>60</td></tr><tr><td>6.0</td><td>120</td></tr><tr><td>8.6</td><td>180</td></tr><tr><td>11.5</td><td>240</td></tr><tr><td>14.4</td><td>300</td></tr></tbody></table></div>		f (mm)	P (N)	0	0	2.7	60	6.0	120	8.6	180	11.5	240	14.4	300
P (N)	f (mm)																											
60	2.7																											
120	6.0																											
180	8.6																											
240	11.5																											
300	14.4																											
f (mm)	P (N)																											
0	0																											
2.7	60																											
6.0	120																											
8.6	180																											
11.5	240																											
14.4	300																											
OBSERVACIONES: Nudo en canto de tabla pasante. Nudos pasantes menores de 3cm en el tercio central.																												

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: TA3(33)- T29

CV: R/R

CR:

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	11.6
240	23.0
360	38.0
480	48.9
600	60.8

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	6.8
120	13.6
180	20.3
240	27.1
300	34.1

OBSERVACIONES: Varios nudos pasantes en tabla.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA																												
TABLA: CA1(33)- T30	CV: ME1/ME1	CR: C27/C27																										
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ																												
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>7.3</td></tr><tr><td>240</td><td>15.3</td></tr><tr><td>360</td><td>23.2</td></tr><tr><td>480</td><td>30.1</td></tr><tr><td>600</td><td>36.9</td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	7.3	240	15.3	360	23.2	480	30.1	600	36.9	<div><p>CA1(33) Diagrama carga (a tercios) - flecha</p><table><thead><tr><th>f (mm)</th><th>2P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>7.3</td><td>120</td></tr><tr><td>15.3</td><td>240</td></tr><tr><td>23.2</td><td>360</td></tr><tr><td>30.1</td><td>480</td></tr><tr><td>36.9</td><td>600</td></tr></tbody></table></div>		f (mm)	2P (N)	0	0	7.3	120	15.3	240	23.2	360	30.1	480	36.9	600
2P (N)	f (mm)																											
120	7.3																											
240	15.3																											
360	23.2																											
480	30.1																											
600	36.9																											
f (mm)	2P (N)																											
0	0																											
7.3	120																											
15.3	240																											
23.2	360																											
30.1	480																											
36.9	600																											
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ																												
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>4.2</td></tr><tr><td>120</td><td>8.9</td></tr><tr><td>180</td><td>13.0</td></tr><tr><td>240</td><td>17.3</td></tr><tr><td>300</td><td>21.9</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	4.2	120	8.9	180	13.0	240	17.3	300	21.9	<div><p>CA1(33) Diagrama carga (al centro) - flecha</p><table><thead><tr><th>f (mm)</th><th>P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>4.2</td><td>60</td></tr><tr><td>8.9</td><td>120</td></tr><tr><td>13.0</td><td>180</td></tr><tr><td>17.3</td><td>240</td></tr><tr><td>21.9</td><td>300</td></tr></tbody></table></div>		f (mm)	P (N)	0	0	4.2	60	8.9	120	13.0	180	17.3	240	21.9	300
P (N)	f (mm)																											
60	4.2																											
120	8.9																											
180	13.0																											
240	17.3																											
300	21.9																											
f (mm)	P (N)																											
0	0																											
4.2	60																											
8.9	120																											
13.0	180																											
17.3	240																											
21.9	300																											
OBSERVACIONES: Varios nudos pasantes a lo largo de la pieza.																												

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: CA3(31)- T31

CV: R/R

CR:

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	6.7
240	13.6
360	20.4
480	27.4
600	35.2

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	3.9
120	8.0
180	12.2
240	16.4
300	20.2

OBSERVACIONES: Nudos pasantes en tabla y canto.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA														
TABLA: CA8(31)- T32	CV: ME-2/ME1	CR: C18/C27												
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ														
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>5.7</td></tr><tr><td>240</td><td>11.6</td></tr><tr><td>360</td><td>17.5</td></tr><tr><td>480</td><td>23.2</td></tr><tr><td>600</td><td>29.1</td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	5.7	240	11.6	360	17.5	480	23.2	600	29.1	<div><p>CA8(31) Diagrama carga (a tercios) - flecha</p> </div>	
2P (N)	f (mm)													
120	5.7													
240	11.6													
360	17.5													
480	23.2													
600	29.1													
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ														
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>3.2</td></tr><tr><td>120</td><td>6.8</td></tr><tr><td>180</td><td>10.4</td></tr><tr><td>240</td><td>14.1</td></tr><tr><td>300</td><td>17.2</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	3.2	120	6.8	180	10.4	240	14.1	300	17.2	<div><p>CA8(31) Diagrama carga (al centro) - flecha</p> </div>	
P (N)	f (mm)													
60	3.2													
120	6.8													
180	10.4													
240	14.1													
300	17.2													
OBSERVACIONES: Nudos pasantes en tabla. Nudos pasante en el tercio central.														

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: TA11(35)- T33

CV: ME-2/ME-1

CR: C18/C27

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	3.5
240	7.4
360	11.3
480	15.3
600	19.1

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	1.8
120	4.2
180	6.4
240	8.8
300	11.1

OBSERVACIONES: Gema en tabla.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: TA9(31)- T34

CV: ME-2/ME-2

CR: C18/C18

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	6.6
240	12.9
360	19.5
480	26.4
600	33.1

TA9(31) Diagrama carga (a tercios) - flecha

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	3.7
120	7.6
180	11.7
240	15.4
300	19.4

TA9(31) Diagrama carga (al centro) - flecha

OBSERVACIONES: Nudos pasantes en tabla.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: TA1(36)- T35

CV: R/R

CR:

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	3.4
240	7.4
360	11.4
480	15.4
600	19.4

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	1.9
120	4.2
180	6.5
240	8.9
300	11.2

OBSERVACIONES: Gemas y nudos pasantes mayores de 3cm.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA														
TABLA: TA2(30)- T36	CV: R/R	CR:												
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; padding: 5px;">2P (N)</th> <th style="width: 50%; padding: 5px;">f (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">120</td><td style="text-align: center;">7.1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">240</td><td style="text-align: center;">14.4</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">360</td><td style="text-align: center;">21.5</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">480</td><td style="text-align: center;">28.8</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">600</td><td style="text-align: center;">36.4</td></tr> </tbody> </table>	2P (N)	f (mm)	120	7.1	240	14.4	360	21.5	480	28.8	600	36.4	<p style="text-align: center;">TA2(30) Diagrama carga (a tercios) - flecha</p>
2P (N)	f (mm)													
120	7.1													
240	14.4													
360	21.5													
480	28.8													
600	36.4													
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; padding: 5px;">P (N)</th> <th style="width: 50%; padding: 5px;">f (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">60</td><td style="text-align: center;">3.8</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">120</td><td style="text-align: center;">8.2</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">180</td><td style="text-align: center;">12.5</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">240</td><td style="text-align: center;">17.0</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">300</td><td style="text-align: center;">21.2</td></tr> </tbody> </table>	P (N)	f (mm)	60	3.8	120	8.2	180	12.5	240	17.0	300	21.2	<p style="text-align: center;">TA2(30) Diagrama carga (al centro) - flecha</p>
P (N)	f (mm)													
60	3.8													
120	8.2													
180	12.5													
240	17.0													
300	21.2													
OBSERVACIONES: Nudo arista y gema en tabla.														

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA														
TABLA: CA4(33)- T37	CV: ME-2/ME-2	CR: C18/C18												
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ														
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>7.6</td></tr><tr><td>240</td><td>15.7</td></tr><tr><td>360</td><td>22.3</td></tr><tr><td>480</td><td>29.9</td></tr><tr><td>600</td><td>37.3</td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	7.6	240	15.7	360	22.3	480	29.9	600	37.3	<div><div>CA4(33) Diagrama carga (a tercios) - flecha</div><p>$E = 9980 \text{ N/mm}^2$</p></div>	
2P (N)	f (mm)													
120	7.6													
240	15.7													
360	22.3													
480	29.9													
600	37.3													
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ														
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>4.2</td></tr><tr><td>120</td><td>8.9</td></tr><tr><td>180</td><td>13.1</td></tr><tr><td>240</td><td>17.7</td></tr><tr><td>300</td><td>21.6</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	4.2	120	8.9	180	13.1	240	17.7	300	21.6	<div><div>CA4(33) Diagrama carga (al centro) - flecha</div><p>$E = 9206 \text{ N/mm}^2$</p></div>	
P (N)	f (mm)													
60	4.2													
120	8.9													
180	13.1													
240	17.7													
300	21.6													
OBSERVACIONES: Nudos pasantes en tabla.														

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: CC7(26)- T38

CV: ME-1/ME-1

CR: C27/C27

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	18.1
240	34.7
360	49.7
480	66.7
600	

CC7(23) Diagrama carga (a tercios) - flecha **CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ**

P (N)	f (mm)
60	10.2
120	20.1
180	30.1
240	40.1
300	50.1

CC7(23) Diagrama carga (al centro) - flecha

OBSERVACIONES:

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: TA2(24)- T39

CV: ME-2/ME-2

CR: C18/C18

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	13.4
240	26.1
360	40.1
480	53.1
600

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	7.7
120	15.6
180	22.1
240	31.4
300	39.4

OBSERVACIONES: Gemas en tabla y en tercio central.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA																												
TABLA: CA5(33)- T40	CV: R/ME-2	CR: -/C18																										
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ																												
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>8.4</td></tr><tr><td>240</td><td>17.2</td></tr><tr><td>360</td><td>25.3</td></tr><tr><td>480</td><td>35.3</td></tr><tr><td>600</td><td>45.2</td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	8.4	240	17.2	360	25.3	480	35.3	600	45.2	<div>CA5(33) Diagrama carga (a tercios) - flecha</div> <table><thead><tr><th>f (mm)</th><th>2P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>10</td><td>120</td></tr><tr><td>20</td><td>240</td></tr><tr><td>30</td><td>360</td></tr><tr><td>40</td><td>480</td></tr><tr><td>50</td><td>600</td></tr></tbody></table>		f (mm)	2P (N)	0	0	10	120	20	240	30	360	40	480	50	600
2P (N)	f (mm)																											
120	8.4																											
240	17.2																											
360	25.3																											
480	35.3																											
600	45.2																											
f (mm)	2P (N)																											
0	0																											
10	120																											
20	240																											
30	360																											
40	480																											
50	600																											
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ																												
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>4.7</td></tr><tr><td>120</td><td>9.8</td></tr><tr><td>180</td><td>14.8</td></tr><tr><td>240</td><td>19.8</td></tr><tr><td>300</td><td>24.8</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	4.7	120	9.8	180	14.8	240	19.8	300	24.8	<div>CA5(33) Diagrama carga (al centro) - flecha</div> <table><thead><tr><th>f (mm)</th><th>P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>5</td><td>60</td></tr><tr><td>10</td><td>120</td></tr><tr><td>15</td><td>180</td></tr><tr><td>20</td><td>240</td></tr><tr><td>25</td><td>300</td></tr></tbody></table>		f (mm)	P (N)	0	0	5	60	10	120	15	180	20	240	25	300
P (N)	f (mm)																											
60	4.7																											
120	9.8																											
180	14.8																											
240	19.8																											
300	24.8																											
f (mm)	P (N)																											
0	0																											
5	60																											
10	120																											
15	180																											
20	240																											
25	300																											
OBSERVACIONES: Nudo en canto. Gema y nudo en arista en el tercio central.																												

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: TA13(27)- T41

CV: R/R

CR:

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	9.0
240	18.6
360	27.6
480	38.6
600	48.6

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	5.2
120	10.6
180	16.1
240	21.4
300	26.7

OBSERVACIONES: Gema en toda su longitud.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA														
TABLA: CC11(21)- T42	CV: ME-1/ME-1	CR: C27/C27												
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">2P (N)</th> <th style="width: 50%;">f (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">120</td><td style="text-align: center;">14.4</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">240</td><td style="text-align: center;">28.5</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">360</td><td style="text-align: center;">43.5</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">480</td><td style="text-align: center;">58.5</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">600</td><td></td></tr> </tbody> </table>	2P (N)	f (mm)	120	14.4	240	28.5	360	43.5	480	58.5	600		<p style="text-align: center;">CC11(21) Diagrama carga (a tercios) - flecha</p>
2P (N)	f (mm)													
120	14.4													
240	28.5													
360	43.5													
480	58.5													
600														
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">P (N)</th> <th style="width: 50%;">f (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">60</td><td style="text-align: center;">8.0</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">120</td><td style="text-align: center;">16.9</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">180</td><td style="text-align: center;">24.8</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">240</td><td style="text-align: center;">33.1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">300</td><td style="text-align: center;">43.0</td></tr> </tbody> </table>	P (N)	f (mm)	60	8.0	120	16.9	180	24.8	240	33.1	300	43.0	<p style="text-align: center;">CC11(21) Diagrama carga (al centro) - flecha</p>
P (N)	f (mm)													
60	8.0													
120	16.9													
180	24.8													
240	33.1													
300	43.0													
OBSERVACIONES:														

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: CA3(22)- T43

CV: R/R

CR:

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	21.1
240	41.1
360	63.1
480	
600

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	13.0
120	25.4
180	38.3
240	48.3
300	62.3

OBSERVACIONES: Gemas y nudos pasantes en tabla.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA																												
TABLA: TA6(31) –T44	CV: ME-1/ME-1	CR: C27/C27																										
CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ																												
<table><tr><th>2P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>120</td><td>8.5</td></tr><tr><td>240</td><td>16.9</td></tr><tr><td>360</td><td>25.2</td></tr><tr><td>480</td><td>34.2</td></tr><tr><td>600</td><td>44.2</td></tr></table>	2P (N)	f (mm)	120	8.5	240	16.9	360	25.2	480	34.2	600	44.2	<div>TA6(31) Diagrama carga (a tercios) - flecha</div> <table><caption>Data for TA6(31) Diagrama carga (a tercios) - flecha</caption><thead><tr><th>f (mm)</th><th>2P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>8.5</td><td>120</td></tr><tr><td>16.9</td><td>240</td></tr><tr><td>25.2</td><td>360</td></tr><tr><td>34.2</td><td>480</td></tr><tr><td>44.2</td><td>600</td></tr></tbody></table>		f (mm)	2P (N)	0	0	8.5	120	16.9	240	25.2	360	34.2	480	44.2	600
2P (N)	f (mm)																											
120	8.5																											
240	16.9																											
360	25.2																											
480	34.2																											
600	44.2																											
f (mm)	2P (N)																											
0	0																											
8.5	120																											
16.9	240																											
25.2	360																											
34.2	480																											
44.2	600																											
CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ																												
<table><tr><th>P (N)</th><th>f (mm)</th></tr><tr><td>60</td><td>4.9</td></tr><tr><td>120</td><td>9.8</td></tr><tr><td>180</td><td>15.1</td></tr><tr><td>240</td><td>19.9</td></tr><tr><td>300</td><td>24.7</td></tr></table>	P (N)	f (mm)	60	4.9	120	9.8	180	15.1	240	19.9	300	24.7	<div>TA6(31) Diagrama carga (al centro) - flecha</div> <table><caption>Data for TA6(31) Diagrama carga (al centro) - flecha</caption><thead><tr><th>f (mm)</th><th>P (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>4.9</td><td>60</td></tr><tr><td>9.8</td><td>120</td></tr><tr><td>15.1</td><td>180</td></tr><tr><td>19.9</td><td>240</td></tr><tr><td>24.7</td><td>300</td></tr></tbody></table>		f (mm)	P (N)	0	0	4.9	60	9.8	120	15.1	180	19.9	240	24.7	300
P (N)	f (mm)																											
60	4.9																											
120	9.8																											
180	15.1																											
240	19.9																											
300	24.7																											
f (mm)	P (N)																											
0	0																											
4.9	60																											
9.8	120																											
15.1	180																											
19.9	240																											
24.7	300																											
OBSERVACIONES: Mal corte en apoyo en tabla.																												

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: CC3(31)- T45

CV: R/-

CR:

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	5.8
240	11.8
360	17.9
480	23.8
600	30.1

CC3(31) Diagrama carga (a tercios) - flecha

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	3.2
120	6.7
180	10.4
240	13.8
300	17.6

CC3(31) Diagrama carga (al centro) - flecha

OBSERVACIONES: Nudo en canto y gema.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: CA2(36)- T46

CV: R/R

CR:

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	4.9
240	9.9
360	14.9
480	19.6
600	24.5

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	2.6
120	5.5
180	8.4
240	11.3
300	14.6

OBSERVACIONES: Nudo en canto, nudos pasantes y gemas en tabla.

ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE TABLAS DE MADERA

TABLA: CA7(34)- T49

CV: R/ME2

CR: -/C18

CARGAS A TERCIOS DE LA LUZ

2P (N)	f (mm)
120	7.5
240	15.0
360	23.6
480	60.4
600	38.3

CARGAS EN EL CENTRO DE LA LUZ

P (N)	f (mm)
60	4.0
120	8.5
180	13.0
240	17.6
300	21.7

OBSERVACIONES: Nudo en canto. Nudo pasante en el tercio central.

ANEXO 2.

Compresión Longitudinal Pequeña Escuadría. Pino Silvestre

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN LONGITUDINAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC1(27)a1

DIMENSIONES: 300.983 x 141.867 x 27.467 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
52.0289	0.0077	0.0081	7781.9702	0.2257	0.2429	483.700

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC1(27)b1

DIMENSIONES: 301.067 x 141.967 x 27.217 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
42.1421	0.0067	0.0099	8001.2129	0.1765	0.2929	519.334

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN LONGITUDINAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC2(27)b1

DIMENSIONES: 300.800 x 143.200 x 27.183 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
17.6099	0.0041	0.0243	4507.2467	0.0408	0.5210	470.540

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC2(27)b2

DIMENSIONES: 301.267 x 142.467 x 27.250 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
38.1041	0.0080	0.0312	6189.8426	0.1826	0.8571	459.284

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN LONGITUDINAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC4(27)a1

DIMENSIONES: 296.450 x 142.983 x 26.917 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{máx.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{máx.}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{máx.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
48.9015	0.0079	0.0096	8209.8762	0.2412	0.3726	534.249

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC4(27)a2

DIMENSIONES: 290.183 x 142.533 x 26.633 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{máx.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{máx.}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{máx.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
53.6780	0.0080	0.0120	8673.2788	0.2580	0.4326	534.888

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN LONGITUDINAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC4(27)a1

DIMENSIONES: 296.450 x 142.983 x 26.917 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
48.9015	0.0079	0.0096	8209.8762	0.2412	0.3726	534.249

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC4(27)a2

DIMENSIONES: 290.183 x 142.533 x 26.633 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
53.6780	0.0080	0.0120	8673.2788	0.2580	0.4326	534.888

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN LONGITUDINAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC4(27)a1

DIMENSIONES: 296.450 x 142.983 x 26.917 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
48.9015	0.0079	0.0096	8209.8762	0.2412	0.3726	534.249

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC4(27)a2

DIMENSIONES: 290.183 x 142.533 x 26.633 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
53.6780	0.0080	0.0120	8673.2788	0.2580	0.4326	534.888

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN LONGITUDINAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC8(27)b

DIMENSIONES: 301.100 x 143.900 x 26.817 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
43.3368	0.0088	0.0109	6620.2747	0.2286	0.3136	430.942

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC9(27)b2

DIMENSIONES: 301.217 x 139.733 x 26.267 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
5.0045	0.0010	0.0036	7038.1091	0.0029	0.0203	551.908

OBSERVACIONES:

ANEXO 3.

Compresión Transversal Pequeña Escuadría. Pino Silvestre

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC1(27)a3

DIMENSIONES: 90.117 x 141.950 x 26.800 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
5.24090	0.0335	0.1180	324.7785	0.1262	0.5152	486.659

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC2(27)a3

DIMENSIONES: 123.483 x 142.500 x 27.150 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
3.8028	0.0352	0.0932	205.9076	0.0916	0.2932	433.979

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC2(27)b3

DIMENSIONES: 68.517 x 142.350 x 27.000 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
4.2878	0.0420	0.1455	202.5049	0.1305	0.5602	444.482

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC3(27)a1

DIMENSIONES: 133.850 x 143.400 x 26.467 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
4.0590	0.0410	0.0911	237.3642	0.1253	0.3166	505.233

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC3(27)b3

DIMENSIONES: 117.717 x 143.183 x 26.333 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
1.5759	0.0274	0.0372	196.0880	0.0344	0.0492	509.181

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC3(27)b2

DIMENSIONES: 133.683 x 144.200 x 26.350 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
4.9385	0.0389	0.0860	280.0881	0.1295	0.3609	517.509

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC4(27)b3

DIMENSIONES: 141.067 x 141.800 x 26.733 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
5.8075	0.0285	0.0841	373.3335	0.1141	0.3996	549.281

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC5(27)a2

DIMENSIONES: 117.133 x 142.800 x 26.367 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
4.4453	0.0265	0.1139	223.1613	0.0812	0.4123	513.644

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC5(27)a3

DIMENSIONES: 140.933 x 142.783 x 26.633 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
5.3617	0.0448	0.1220	300.7566	0.1705	0.5438	478.896

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC5(27)b3

DIMENSIONES: 147.267 x 142.617 x 26.550 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
1.3646	0.0149	0.0351	272.9507	0.0159	0.0398	462.769

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC5(27)a3

DIMENSIONES: 140.933 x 142.783 x 26.633 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
5.3617	0.0448	0.1220	300.7566	0.1705	0.5438	478.896

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC5(27)b3

DIMENSIONES: 147.267 x 142.617 x 26.550 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
1.3646	0.0149	0.0351	272.9507	0.0159	0.0398	462.769

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC7(27)b2

DIMENSIONES: 138.067 x 142.933 x 26.300 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
1.5941	0.0091	0.0203	379.8940	0.0117	0.0288	648.308

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC7(27)b3

DIMENSIONES: 139.483 x 142.917 x 26.217 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
6.1582	0.0247	0.0872	458.6680	0.1077	0.4712	676.520

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC8(27)a3

DIMENSIONES: 149.083 x 142.117 x 26.467 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
1.1897	0.0075	0.0163	265.4582	0.0065	0.0156	461.645

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC8(27)a4

DIMENSIONES: 94.217 x 142.000 x 26.500 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
2.3730	0.0125	0.0234	255.3278	0.0191	0.0422	463.872

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC8(27)b3

DIMENSIONES: 136.967 x 143.033 x 26.517 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
4.3953	0.0299	0.1117	256.9692	0.0902	0.3835	436.877

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC9(27)a3

DIMENSIONES: 131.183 x 140.600 x 26.100 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
4.7591	0.0247	0.1019	266.5767	0.0751	0.4202	526.093

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC9(27)a4

DIMENSIONES: 128.817 x 140.417 x 26.150 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm^2)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	A_u (N/mm^2)	ρ (kg/m^3)
4.4727	0.0233	0.0980	245.7461	0.0679	0.3744	530.020

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC9(27)b3

DIMENSIONES: 135.283 x 139.417 x 26.400 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm^2)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	A_u (N/mm^2)	ρ (kg/m^3)
6.5004	0.0264	0.0736	368.0226	0.1104	0.3718	557.435

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC10(27)a2

DIMENSIONES: 148.167 x 142.717 x 26.450 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC10(27)a3

DIMENSIONES: 150.600 x 143.117 x 26.233 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: CC10(27)b2

DIMENSIONES: 137.083 x 141.483 x 26.033 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm^2)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	A_u (N/mm^2)	ρ (kg/m^3)
1.9187	0.0065	0.0630	453.5060	0.0096	0.1104	573.580

OBSERVACIONES:

PIEZA: CC10(27)b3

DIMENSIONES: 134.700 x 141.950 x 26.217 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm^2)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	A_u (N/mm^2)	ρ (kg/m^3)
6.1588	0.0190	0.1321	480.4253	0.0753	0.7251	610.996

OBSERVACIONES:

ANEXO 4.

Compresión Transversal Pequeña Escuadría. Pino Insigne

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: IN1a3

DIMENSIONES: 144.533 x 146.767 x 25.833 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm^2)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	A_u (N/mm^2)	ρ (kg/m^3)
6.7129	0.0268	0.0541	427.3674	0.1229	0.2895	595.769

OBSERVACIONES:

PIEZA: IN1b3

DIMENSIONES: 147.417 x 147.100 x 25.500 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm^2)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	A_u (N/mm^2)	ρ (kg/m^3)
9.2275	0.0285	0.0498	479.7151	0.1683	0.3493	596.907

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: IN1b4

DIMENSIONES: 148.250 x 146.867 x 25.567 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
8.9811	0.0266	0.0562	444.4749	0.1441	0.3892	585.561

OBSERVACIONES:

PIEZA: IN2a3

DIMENSIONES: 148.200 x 159.917 x 25.167 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
8.2831	0.0318	0.0628	527.9369	0.1905	0.4337	618.301

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: IN2a4

DIMENSIONES: 148.650 x 159.617 x 25.500 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm^2)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	A_u (N/mm^2)	ρ (kg/m^3)
8.2365	0.0286	0.0437	502.6007	0.1616	0.2777	615.547

OBSERVACIONES:

PIEZA: IN2b3

DIMENSIONES: 135.383 x 160.283 x 25.250 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm^2)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm^2)	A_u (N/mm^2)	ρ (kg/m^3)
6.2397	0.0176	0.0716	428.0938	0.0638	0.5084	598.320

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: IN3a3

DIMENSIONES: 143.417 x 165.317 x 26.600 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
6.1321	0.0335	0.0644	300.4722	0.1385	0.3146	536.704

OBSERVACIONES:

PIEZA: IN3b3

DIMENSIONES: 146.100 x 165.850 x 26.133 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
7.5601	0.0304	0.0443	412.5849	0.1499	0.2509	579.791

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA: IN3b4

DIMENSIONES: 149.250 x 165.450 x 26.433 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
7.5601	0.0292	0.0544	391.5657	0.1409	0.3012	568.628

OBSERVACIONES:

PIEZA: IN4a2

DIMENSIONES: 130.550 x 163.800 x 24.533 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
7.1805	0.0291	0.0523	448.0948	0.1475	0.2984	599.726

OBSERVACIONES:

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN TRANSVERSAL DE PIEZAS DE MADERA DE
PINO SILVESTRE DE PEQUEÑA ESCUADRÍA

PIEZA:

IN4b3

DIMENSIONES:

148.683 x 162.833 x 26.267 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
8.4757	0.0366	0.0603	411.5361	0.2131	0.3941	591.935

OBSERVACIONES:

PIEZA:

IN4b4

DIMENSIONES:

148.733 x 162.967 x 25.700 mm

ENSAYO HASTA ROTURA

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
5.6789	0.0270	0.0424	324.9033	0.1030	0.1871	569.758

OBSERVACIONES:

ANEXO 5.

Compresión Longitudinal Gran escuadría. Pino Silvestre

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A1							
DIMENSIONES:			298.283 x 154.45 x 154.517 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENCIA

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ESLASTICIDAD LONGITUDINAL

ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA

$\sigma_{m\acute{a}x}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$	$A_u/A_{m\acute{a}x}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
46,448	0.008615	0.068056	3866,1702	0.2457	2,6202	7,900	10,663	532,523	12226,943	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A2			<div> </div> <div> </div>				
DIMENSIONES:			299.767 x 153.700 x 151.900 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<div> </div> <div>E1 = 3750,476 N/mm2</div> <div>E2 = 3878,367 N/mm2</div> <div>E3 = 3795,722 N/mm2</div>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:
<div> </div> <div> </div>		
$\sigma_{m\acute{a}x}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$	$A_u/A_{m\acute{a}x}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
51.099	0.007417	0.040031	3795.722	0.2152	1.6484	5.397	7.660	679.429	12935.937	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A3
DIMENSIONES:			299.717 x 153 x 153.933 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<p>$E_1 = 4095,342 \text{ N/mm}^2$ $E_2 = 4190,639 \text{ N/mm}^2$ $E_3 = 4164,497 \text{ N/mm}^2$</p>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x.}$	$A_u/A_{m\acute{a}x.}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
55.508	0.006878	0.052550	4164.497	0.2270	2.4072	7.640	10.603	604.644	12621.579	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA									
PIEZA:		A4
DIMENSIONES:		299.783 x 154.733 x 155.250 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:		ME-2 C18

ENSAYO HASTA ROTURA					MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<p>$E_1 = 4009,666 \text{ N/mm}^2$ $E_2 = 4165,406 \text{ N/mm}^2$ $E_3 = 4225,711 \text{ N/mm}^2$</p>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$	$A_u/A_{m\acute{a}x}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)
52.260	0.004711	0.048702	4225.711	0.1408	2.1179	10.338	15.041	505.659	10889.48 3

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA									
PIEZA:		A5				<div> </div> <div> </div>			
DIMENSIONES:		299.667 x 150.700 x 154.367 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE: R									
<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>			
ENSAYO HASTA ROTURA					MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL				
<div> </div>					<div> <p>E (N/mm²)</p><p>σ (N/mm²)</p><p>ϵ</p><p>E1 = 3850,132 N/mm2</p><p>E2 = 4056,099 N/mm2</p><p>E3 = 4104,369 N/mm2</p></div>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:									
<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>	
$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm²)	A_u (N/mm²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x.}$	$A_u/A_{m\acute{a}x.}$	ρ (kg/m³)	E_d (N/mm²)
50,096	0,003889	0,017353	4104,369	0,0895	0,6696	4,462	7,479	553,222	16664,449

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA									
PIEZA:			A6				<div> </div> <div> </div>		
DIMENSIONES:			298.150 x 152.967 x 154.000 mm						
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:									
<div> </div>			<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>		
ENSAYO HASTA ROTURA					MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL				
<div> </div>					<div> </div> <div>E1 = 4486,958 N/mm2</div> <div>E2 = 4698,127 N/mm2</div> <div>E3 = 4763,585 N/mm2</div>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:									
<div> </div>			<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>		<div> </div> <div> </div>
σ _{máx.} (N/mm ²)	ε _{máx.}	ε _u	E _s (N/mm ²)	A _{máx.} (N/mm ²)	A _u (N/mm ²)	ε _u /ε _{máx}	A _u /A _{máx}	ρ (kg/m ³)	E _d (N/mm ²)
48.207	0.005713	0.015261	4763.585	0.1548	0.5506	2.671	3.557	522.220	16310.005

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A7					<div> </div> <div> </div>		
DIMENSIONES:			298.200 x 154.533 x 152.967 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:										
<div> </div>			<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>			
ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL				
<div> </div>						<div> </div> <div>E1 = 4597,182 N/mm2 E2 = 4461,334 N/mm2 E3 = 4328,778 N/mm2</div>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:										
<div> </div>			<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>		<div> </div> <div> </div>	
σ _{máx.} (N/mm ²)	ε _{máx.}	ε _u	E _s (N/mm ²)	A _{máx.} (N/mm ²)	A _u (N/mm ²)	ε _u /ε _{máx}	A _u /A _{máx}	ρ (kg/m ³)	E _d (N/mm ²)	
64.632	0.004953	0.024480	4328.778	0.1572	1.2426	4.943	7.904	560.648	17648.145	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A8					<div> </div> <div> </div>		
DIMENSIONES:			299,867 x 153,200 x 154,000 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<div><p>E (N/mm²)</p> <p>— E1 = 4146,734 N/mm2 — E2 = 4146,734 N/mm2 — E3 = 4146,734 N/mm2</p></div>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:
<div> </div> <div> </div>		
$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x.}$	$A_u/A_{m\acute{a}x.}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
49,231	0,006866	0,133392	4146,734	0,1832	5,5401	19,427	30,248	579,163	13163,027	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A9
DIMENSIONES:			299,300 x 154,783 x 154,283 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL

ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$	$A_u/A_{m\acute{a}x}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
48,395	0,007372	0,126963	3998,377	0,2043	5,1817	17,223	25,368	514,842	12056,141	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A10					<div> </div>		
DIMENSIONES:			299,833 x 153,567 x 152,633 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<div><p>E (N/mm²)</p> <p>— E1 = 4471,019 N/mm2 — E2 = 4471,019 N/mm2 — E3 = 4471,019 N/mm2</p></div>				
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE TRAS ROTURA:
<div> </div>		
$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E_s (N/mm²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm²)	A_u (N/mm²)	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$	$A_u/A_{\text{máx}}$	ρ (kg/m³)	E_d (N/mm²)	
63,078	0,007221	0,042357	4471,019	0,2316	2,1377	5,866	9,228	521,677	14284,082	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A11
DIMENSIONES:			299,833 x 152,800 x 153,233 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL

ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$	$A_u/A_{\text{máx}}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
58,623	0,004930	0,028849	4536,307	0,1516	1,3575	5,852	8,953	501,402	15719,076	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A12					<div> </div> <div> </div>		
DIMENSIONES:			299.883 x 153.000 x 152.933 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<div><p>E (N/mm²)</p> <p>— E1 = 4581,518 N/mm² — E2 = 4581,518 N/mm² — E3 = 4581,518 N/mm²</p></div>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:
<div> </div> <div> </div>	
$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$	$A_u/A_{m\acute{a}x}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
63.756	0.005152	0.025510	4581.518	0.1767	1.2929	4.951	7.317	518.875	15538.403	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA									
PIEZA:			A15						
DIMENSIONES:			299.983 x 152.717 x 152.750 mm						
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA					MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<p>E (N/mm²)</p> <p>— E1 = 4431,066 N/mm² — E2 = 4343,776 N/mm² — E3 = 4173,732 N/mm²</p>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$	$A_u/A_{\text{máx}}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)
62.600	0.004868	0.067671	4173.732	0.1524	3.5334	13.901	23.190	514.515	16298.133

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A16
DIMENSIONES:			300.017 x 152.050 x 152.867 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL

CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE TRAS ROTURA:

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$	$A_u/A_{m\acute{a}x}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
53,030	0,006847	0,064663	4219,087	0,1995	2,8362	9,443	14,218	597,972	13099,531	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A17			<div> </div> <div> </div>				
DIMENSIONES:			299.830 x 153.050 x 152.617 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<div> </div> <p>E (N/mm²)</p> <p>σ (N/mm²)</p> <p>ϵ</p> <p>E1 = 4952,855 N/mm2</p> <p>E2 = 5207,781 N/mm2</p> <p>E3 = 5215,179 N/mm2</p>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:
<div> </div> <div> </div>		
$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$	$A_u/A_{m\acute{a}x}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
68,944	0,003860	0,133408	5215,179	0,1390	7,8201	34,558	56,259	516,656	15637,531	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA									
PIEZA:			A18
DIMENSIONES:			298.050 x 149.617 x 151.500 mm						
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE: ME-1 C27

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<p>$E_1 = 5427,523 \text{ N/mm}^2$ $E_2 = 5596,379 \text{ N/mm}^2$ $E_3 = 5202,545 \text{ N/mm}^2$</p>			
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$	$A_u/A_{m\acute{a}x}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)
68,853	0,006633	0,017782	5202,545	0,2587	0,9189	2,681	3,552	596,473	18721,730

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA									
PIEZA:		A19						<div> </div> <div> </div>	
DIMENSIONES:		299.767 x 153.717 x 153.150 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE: ME-1 C27									
<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>			
ENSAYO HASTA ROTURA					MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL				
<div> </div>					<div> </div>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:									
<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>		<div> </div> <div> </div>	
$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x.}$	$A_u/A_{m\acute{a}x.}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)
57.464	0.005554	0.020683	4949.070	0.1865	0.9341	3.724	5.009	475.923	13934.267

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A20
DIMENSIONES:			299.767 x 153.717 x 153.150 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE: ME-2 C18

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<p>E (N/mm²)</p> <p>σ (N/mm²)</p> <p>ϵ</p> <p>— E1 = 5101,514 N/mm²</p> <p>— E2 = 5011,485 N/mm²</p> <p>— E3 = 4986,442 N/mm²</p>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$	$A_u/A_{m\acute{a}x}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
59,821	0,006711	0,013177	4986,442	0,2454	0,5780	1,963	2,356	529,391	15402,424	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A22
DIMENSIONES:			299.667 x 152.617 x 151.950 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE:

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<p>$E_1 = 4371,549 \text{ N/mm}^2$ $E_2 = 4316,167 \text{ N/mm}^2$ $E_3 = 4348,325 \text{ N/mm}^2$</p>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$	$A_u/A_{\text{máx}}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
57.240	0.007667	0.104282	4348.325	0.2504	5.0064	13.602	19.997	639.949	12319.158	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A23
DIMENSIONES:			298.333 x 152.067 x 151.600 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE: ME-2 C18

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<p>$E_1 = 3977,569 \text{ N/mm}^2$ $E_2 = 4171,753 \text{ N/mm}^2$ $E_3 = 4134,713 \text{ N/mm}^2$</p>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$	$A_u/A_{\text{máx}}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
62.030	0.007019	0.058324	4134.713	0.2631	3.0000	8.310	11.402	497.283	10907.582	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A24					<div> </div> <div> </div>		
DIMENSIONES:			299.750 x 152.083 x 152.400 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE: ME-1 C27										
<div> </div>			<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>			
ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL				
<div> </div>						<div><div><div><div><div></div><div>E (N/mm²)</div></div><div> </div></div><div><div>E1 = 4895,777 N/mm2</div><div>E2 = 5007,357 N/mm2</div><div>E3 = 5085,928 N/mm2</div></div></div></div>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:										
<div> </div>			<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>		<div> </div>	
$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$	$A_u/A_{\text{máx}}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
68,403	0,006523	0,034362	5085,928	0,2332	1,8708	5,268	8,023	513,281	14891,677	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A25
DIMENSIONES:			298.683 x 152.000 x 149.600 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE: ME-1 C27

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL

ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

σ _{máx.} (N/mm ²)	ε _{máx.}	ε _u	E _S (N/mm ²)	A _{máx.} (N/mm ²)	A _u (N/mm ²)	ε _u /ε _{máx}	A _u /A _{máx}	ρ (kg/m ³)	E _d (N/mm ²)	
77,048	0,007418	0,133921	5325,592	0,3264	8,7086	18,052	26,679	555,021	16398,181	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A27
DIMENSIONES:			297.783 x 152.500 x 152.100 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE: ME-2 C18

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL

ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x}$	$A_u/A_{m\acute{a}x}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
55.843	0.004531	0.070521	4632.072	0.1363	3.3055	15.564	24.254	503.449	11265.864	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA										
PIEZA:			A28
DIMENSIONES:			297.967 x 152.967 x 151.950 mm							
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE: ME-1 C27

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL
<p>E (N/mm²)</p> <p>— $E_1 = 5210,072$ N/mm²</p> <p>— $E_2 = 5208,079$ N/mm²</p> <p>— $E_3 = 5279,396$ N/mm²</p>				
ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{m\acute{a}x.}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{m\acute{a}x.}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{m\acute{a}x.}$	$A_u/A_{m\acute{a}x.}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)	
72.739	0.005319	0.040944	5279.396	0.2050	2.4335	7.697	11.870	524.638	16033.111	

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PIEZAS DE MADERA DE PINO SILVESTRE DE GRAN ESCUADRÍA											
PIEZA:			A29
DIMENSIONES:			299.400 x 151.917 x 152.400 mm								
CLASIFICACIÓN VISUAL Y RESISTENTE: R

ENSAYO HASTA ROTURA						MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL

ASPECTO VISUAL DESPUÉS DE LA ROTURA:

$\sigma_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máx.}}$	ϵ_u	E_s (N/mm ²)	$A_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	A_u (N/mm ²)	$\epsilon_u/\epsilon_{\text{máx}}$	$A_u/A_{\text{máx}}$	ρ (kg/m ³)	E_d (N/mm ²)		
50,138	0,009869	0,081830	3961,937	0,2799	3,3827	8,292	12,087	584,110	10086,268		