

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
DEPARTAMENT DE CONSTRUCCIONS ARQUITECTÒNIQUES I

TESIS DOCTORAL

CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA MADERA DE *Pinus radiata* D. Don PROCEDENTE DE CATALUÑA MEDIANTE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS Y SU APLICABILIDAD EN LA DIAGNOSIS ESTRUCTURAL

Doctorando:
JOAQUÍN MONTÓN LECUMBERRI

Directores:
FRANCISCO ARRIAGA MARTITEGUI
Dr. Arquitecto
JAUME AVELLANEDA I DIAZ-GRANDE
Dr. Arquitecto

2012



Acta de qualificació de tesi doctoral

Curs acadèmic:

Nom i cognoms

DNI / NIE / Passaport

Programa de doctorat

Unitat estructural responsable del programa

Resolució del Tribunal

Reunit el Tribunal designat a l'efecte, el doctorand / la doctoranda exposa el tema de la seva tesi doctoral titulada

Acabada la lectura i després de donar resposta a les qüestions formulades pels membres titulars del tribunal, aquest atorga la qualificació:

APTA/E NO APTA/E

(Nom, cognoms i signatura)		(Nom, cognoms i signatura)	
President/a		Secretari/ària	
(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)
Vocal	Vocal	Vocal	Vocal

_____ d'/de _____ de _____

El resultat de l'escrutini dels vots emesos pels membres titulars del tribunal, efectuat per l'Escola de Doctorat, a instància de la Comissió de Doctorat de la UPC, atorga la MENCIÓ CUM LAUDE:

SI NO

(Nom, cognoms i signatura)		(Nom, cognoms i signatura)	
Presidenta de la Comissió de Doctorat		Secretària de la Comissió de Doctorat	

Barcelona, _____ d'/de _____ de _____

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ARQUITECTURA DE BARCELONA
DEPARTAMENT DE CONSTRUCCIONS ARQUITECTÒNIQUES I
PROGRAMA DE DOCTORAT EN CONSTRUCCIÓ, RESTAURACIÓ I REHABILITACIÓ ARQUITECTÒNICA

Tesis doctoral

Clasificación estructural de la madera de *Pinus radiata* D.
Don procedente de Cataluña mediante métodos no
destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural

Doctorando:

JOAQUÍN MONTÓN LECUMBERRI

Directores:

FRANCISCO ARRIAGA MARTITEGUI

Dr. Arquitecto

JAUME AVELLANEDA I DIAZ-GRANDE

Dr. Arquitecto

2012

INDICE

Agradecimientos	1
Resumen	3
Resum	5
Summary	7
1. introducción.....	9
2. objetivos	11
3. antecedentes	13
3.1. Madera Estructural: madera de pequeña y gran escuadría	13
3.1.1. Probetas de pequeña dimensión frente a probetas de tamaño estructural	13
3.1.2. Particularidades de las piezas de gran escuadría	15
3.1.3. Efecto del tamaño	16
3.2. La madera de pino radiata para uso estructural.....	17
3.3. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera aserrada	25
3.3.1. Clasificación visual.....	25
3.3.2. Clasificación automática.....	26
3.3.2.1. Clasificación Mecánica.....	27
3.3.2.2. Clasificación por métodos acústicos.....	29
3.3.2.2.1. Introducción.....	29
3.3.2.2.2. Antecedentes.....	29
3.3.2.2.3. Ondas acústicas.....	36
3.3.2.2.4. Ultrasonidos.....	33
3.3.2.2.5. Ondas sónicas	30
3.3.2.2.6. Análisis de vibraciones.....	38
3.3.2.3. Clasificación mediante técnicas mixtas	41
3.4. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas y del estado de la madera en estructuras existentes	44
3.4.1. Introducción.....	44
3.4.2. Clasificación visual en estructuras existentes.....	44
3.4.3. Estimación de las propiedades elásticas	46
3.4.4. Determinación de la densidad.....	46
a) <i>Penetrómetro Pilodyn</i>	47

<i>b) Extracción o arrancamiento de tornillo</i>	47
<i>c) Extracción de probetas testigo</i>	48
<i>d) Sondeo con taladro (Resistógrafo)</i>	50
<i>e) Esclerómetro Schmidt</i>	50
4. Métodos y equipos utilizados.....	53
4.1. Equipo Humano	53
4.2. Pórtico de ensayos mecánicos.....	53
4.2.1. Pórtico.....	53
4.2.2. Cilindro oleohidráulico	53
4.2.3. Puente superior.....	53
4.2.4. Célula de carga.....	54
4.2.5. Extensómetros.....	54
4.2.6. Perchas	55
4.2.7. Sistema de adquisición de datos.....	55
4.3. Equipo de ultrasonidos.....	55
4.4. Equipo de medición de velocidad de ondas acústicas.....	56
4.5. Equipo de análisis de vibración.....	56
4.6. Penetrómetro	57
4.7. Equipo de arranque de tornillo.....	58
4.8. Esclerómetro	58
4.9. Sondeo con Resistógrafo.....	59
4.10. Otros medios y equipos diversos.....	60
5. Metodología	65
5.1. Material de ensayo	65
5.2. Desarrollo experimental.....	65
5.3. Determinación de las propiedades físicas	67
5.3.1. Determinación del contenido de humedad.....	67
5.3.2. Determinación de la densidad.....	68
5.4. Clasificación visual.....	68
5.5. Profundidad de penetración y estimación de la densidad	72
5.6. Resistencia al arranque de tornillo y estimación de la densidad	74
5.7. Extracción de probetas testigo y determinación de la densidad.....	74
5.8. Tiempo de transmisión de onda ultrasónica.....	75
5.9. Tiempo de transmisión de onda de impacto.....	78

5.10. Análisis de vibraciones	79
5.10.1. Frecuencia natural de vibración longitudinal.....	79
5.10.2. Frecuencia natural de vibración transversal.....	80
5.11. Preparación de una base de datos-fichas fotográficas	81
5.12. Ensayo mecánico de flexión.....	83
5.12.1. Módulo de elasticidad local	83
5.12.2. Módulo de elasticidad global	85
5.12.3. Tensión de rotura	87
6. Análisis de resultados.....	89
6.1. Introducción	89
6.2. Clasificación visual	89
6.2.1. Rendimiento de la clasificación	89
6.2.2. Análisis de las causas de rechazo de las piezas.....	95
6.2.3. Parámetros comunes en piezas con alabeo.....	99
6.2.4. Conclusiones	101
6.3. Estimación de la densidad.....	101
6.3.1. Introducción. Densidad global y local	101
6.3.2. Probetas testigo	106
6.3.3. Arranque de tornillo.....	107
6.3.4. Penetrómetro	110
6.4 Módulo de elasticidad	111
6.4.1. Módulo de elasticidad global	111
6.4.2. Módulo de elasticidad local	111
6.4.3. Tiempo de transmisión de ondas.....	114
6.4.3.1. Velocidad de propagación de onda ultrasónica.....	114
6.4.3.2. Velocidad de propagación de onda de impacto	116
6.4.4. Frecuencia natural de vibración	118
6.4.4.1. Frecuencia natural de vibración longitudinal	118
6.4.4.2. Frecuencia de vibración transversal (o de flexión).....	119
6.4.5. Módulo de elasticidad estático vs. dinámicos.....	120
6.4.6. Módulo de elasticidad estático vs. velocidad.....	124
6.5. Tensión de rotura	125
6.5.1. Tensión de rotura a flexión	125
6.5.2. Tensión de rotura a flexión vs. módulo de elasticidad dinámico .	126
6.5.3. Tensión de rotura a flexión vs. velocidad	127
6.5.4. Corrección por nudosidad.....	128
6.6. Tensión de rotura a flexión, módulo de elasticidad y densidad	130

7. Conclusiones y líneas de investigación futuras	133
7.1. Metodología	133
7.2. Rendimiento de la clasificación visual.....	134
7.3. Estimación de la densidad.....	135
7.4. Estimación del módulo de elasticidad.....	135
7.5. Estimación de la tensión de rotura	136
7.6. Futuras líneas de investigación	137
Bibliografía	139
Anexo 1: Consideraciones sobre el módulo de elasticidad global y local	155
A1.1. Objeto.....	155
A1.2. Módulo de elasticidad global (UNE -EN 408:2003).....	156
A1.3. Módulo de elasticidad local (UNE 408:2003 Y UNE 408:2011).....	157
A1.4. Estimación del módulo de elasticidad transversal G.....	158
A1.5. Módulo de elasticidad global en flexión (UNE-EN 408:2011).....	159
A1.6. Valor medio del módulo de elasticidad de la muestra (UNE-EN 384:2010)	160

Volumen 2

Anexo 2: Tablas de los resultados de los ensayos

Guía de interpretación de la fichas de los ensayos.....	5
Montaje fotográfico de las vigas	9
Fichas	17

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Relación entre resistencia y duración de la carga. Curva de Madison y curva adoptada en el Eurocódigo 5 (Arriaga et al: 2005)	14
Figura 3.2. Distribución del pino radiata en España (INIA)	18
Figura 3.3. Madera laminada y tablero de madera contralaminada (Arriaga, 2009).....	20
Figura 3.4. Frontón Ermitaberri. Arquitectos: IA+B Arkitektura. Zeberio, Vizcaya. 2007.....	20
Figura 3.5. Bodega vinos Ventolera. Arquitecto: Francisco Izquierdo. San Juan de Huinca, Leyda, Chile. 2009	21
Figura 3.6. Rubys Beach Resort. Arquitectos Broadway Malyan. Abu Dhabi 2010.	21
Figura 3.7. BIP Computers. Arquitecto: Alberto Mozó. Providencia, Santiago, Chile. 2007. ...	21
Figura 3.8. Casa Vita. Arquitecto: Iñaki Aspiazu. Ea, Vizcaya. 2010.	22
Figura 3.9. DigiPen Bilbao Institute of Technology. Arquitecto: Ander de la Fuente. Zierbena, Vizcaya. 2011.....	22
Figura 3.10. Ikazteguieta Udaletxea. Arquitectos: Astazaldi Arkitektura. Ikazteguieta, Guipúzcoa. 2011.	23
Figura 3.11. Casa SV. Arquitecto: BSZ Arquitectos – Andres Rainer Schulz Villanueva. Laguna de Aculeo/Paine, Chile. 2009.....	23
Figura 3.12. Edificio corporativo Vespuzio Sur. Arquitectos: Alex Brahm, David Bonomi, Marcelo Leturia, Maite Martolomé. Autopista Vespucio Sur, Macul, Santiago, Chile. 2005.	24
Figura 3.13. Fachada de la E. U. de Magisterio. Arquitectos: Estudio K, Iñaki Arrieta. San Sebastian. 2011. Madera termotratada.	24
Figura 3.14. Puente de madera laminada de 24m en Chile y puentes de 66 m de luz y puente de 86 m de longitud en Nueva Zelanda.....	25
Figura 3.15. Esquema de funcionamiento de las pruebas de flexión	28
Figura 3.16. Esquema de la máquina Computermatic.....	28
Figura 3.17. Esquema de la máquina Cook-Bolinder	28
Figura 3.18. Ultrasonidos por el método de pulso-eco (Esteban, 2003)	34
Figura 3.19. Ultrasonidos por el método de transmisión de ultrasonidos (Esteban 2003).....	34
Figura 3.20. Aplicación de ondas sónicas por el método de transmisión, medición directa.....	37
Figura 3.21. Vibración longitudinal (Íñiguez 2007).....	38
Figura 3.22. Vibración transversal (Íñiguez 2007).....	39
Figura 3.23. Vista de la máquina, mecanismo de impacto y pantalla de datos del Viscan	42
Figura 3.24. Microtec 702 y esquema del sistema de Rayos X.....	42
Figura 3.25. Euro-GreComat 704. Rayos X + Flexión	43
Figura 3.26. GoldenEye 706 Rayos X + Vibración	43
Figura 3.27. Barrena Pressler	48

Figura 3.28. Fractometer (Catálogo de IML).....	49
Figura 3.29. Taladro y ensayo de compresión de probetas de Core-Drilling. (Kasal, B).	49
Figura 3.30. Probetas testigo, extracción, pesado y probetas.....	49
Figura 4.1. Pórtico de ensayos de la EPSEB.....	54
Figura 4.2. Puente superior y célula de carga.....	54
Figura 4.3. Extensómetro APEK.....	54
Figura 4.4. Perchas para la medición del módulo de elasticidad local.....	55
Figura 4.5. Sistema de adquisición de datos National Instruments.....	55
Figura 4.6. Equipo Sylvatest Duo de CBS-CTB.....	56
Figura 4.7. Equipo Microsekond Timer de Fakopp.....	56
Figura 4.8. Equipo Portable Lumber Grader de Fakopp.....	57
Figura 4.9. Equipo Pilodyn 6J de la empresa Proceq.....	57
Figura 4.10. Equipo Screw Withdrawal Force Meter de la empresa Fakopp.....	58
Figura 4.11. Esclerómetro Schmitdt.....	59
Figura 4.12. RESISTOGRAPH 4453 P de la empresa Rinntech.....	60
Figura 4.13. Xilohigrómetro HYDROMETTE HT 85 T de GANN.....	61
Figura 4.14. Balanza GENIWEIGHER RS 224-3704 ST.....	62
Figura 4.15. Estufa de la marca SELECTA modelo 297D.....	63
Figura 4.16. Calibre digital Storm.....	64
Figura 4.17. Mesa de trabajo.....	65
Figura 4.18. Trazador.....	65
Figura 5.1. Penetrómetro Pilodyn 6J.....	73
Figura 5.2. Penetración en dirección radial y tangencial.....	73
Figura 5.3. Proceso de ensayo.....	73
Figura 5.4. Vista general del equipo de arrancamiento (SWFM o MAT).....	74
Figura 5.5. Extracción de microprobetas.....	75
Figura 5.6. Equipo Sylvatest Duo.....	76
Figura 5.7. Medición del tiempo de propagación directa de la onda en lectura directa de testa.....	76
Figura 5.8. Medición del tiempo de propagación directa de la onda entre caras opuestas a una distancia de 18 h.....	77
Figura 5.9. Medición del tiempo de propagación indirecta de la onda entre caras opuestas a una distancia de 18 h.....	77
Figura 5.10. Microsecond Timer.....	79
Figura 5.11. Ensayo de frecuencia de vibración longitudinal.....	80
Figura 5.12. Proceso de reproducción fotográfica de las cuatro caras de la probeta.....	81
Figura 5.13. Resultado final del registro fotográfico de una probeta, PR-005.....	82
Figura 5.14. Cabezas de 50 probetas en las que se marcan en rojo las rechazadas.....	82

Figura 5.15. Esquema del ensayo de determinación del módulo de elasticidad local.....	83
Figura 5.16. Disposición de las perchas soporte de los extensómetros para el ensayo del módulo de elasticidad local	84
Figura 5.17. Gráfico fuerza / deformación en el tramo elástico.....	85
Figura 5.18. Esquema del ensayo de determinación del módulo de elasticidad global	85
Figura 5.19. Disposición de los distintos elementos en el ensayo del módulo de elasticidad global	86
Figura 5.20. Esquema del ensayo de tensión de rotura	87
Figura 5.21. Rotura de la probeta fuera del tercio central.....	88
Figura 6.1. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura a flexión, en N/mm ² para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).....	92
Figura 6.2. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura a flexión, en N/mm ² para clase resistente menor o igual que C18 (ClaseVgeB)	92
Figura 6.3. Gráfico de residuos vs porcentaje del ANOVA (normalidad). Tensión de rotura a flexión, en N/mm ² para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).....	92
Figura 6.4. Gráfico de valores predichos vs residuos del ANOVA (homocedasticidad). Tensión de rotura a flexión, en N/mm ² para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).....	93
Figura 6.5. Gráfico de residuos vs porcentaje del ANOVA (homocedasticidad). Tensión de rotura a flexión, en N/mm ² para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA)	93
Figura 6.6. Gráfico de residuos vs número de orden del ANOVA (linealidad). Tensión de rotura a flexión, en N/mm ² para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).....	93
Figura 6.7. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura en N/mm ² . Clasificación como pequeña escuadría	95
Figura 6.8 Porcentaje de piezas rechazadas por cada defecto para la calidad MEG, cuando la clase resistente a asignar fuera superior a C18 (ClaseVgeA).....	96
Figura 6.9 Porcentaje de piezas rechazadas por cada defecto para la calidad MEG, cuando la clase resistente a asignar fuera menor o igual a C18 (ClaseVgeB).....	96
Figura 6.10. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura en flexión en N/mm ² . Calidades visuales sin tener en cuenta el alabeo para clase resistente superior a C18	98
Figura 6.11. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura en flexión en N/mm ² . Calidades visuales sin tener en cuenta el alabeo para clase resistente menor o igual a C18	99
Figura 6.12. Gráfico de medias del ANOVA. Espesor medio del anillo en mm. Calidades visuales atendiendo únicamente al criterio de alabeo para clase resistente superior a C18 (Clase A).	100
Figura 6.13. Gráfico de medias del ANOVA. Espesor medio del anillo en mm. Calidades visuales atendiendo únicamente al criterio de alabeo para clase resistente menor o igual a C18(Clase B).....	101
Figura 6.14. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura a flexión en N/mm ² . Calidades visuales atendiendo únicamente al criterio de alabeo para clase resistente superior a C18	101
Figura 6.15. Histograma de frecuencias de la densidad local (kg/m ³) al 12%.....	101
Figura 6.16. Histograma de frecuencias de la densidad global (kg/m ³) al 12%.....	103
Figura 6.17. Recta de regresión entre la densidad local y la global	102

Figura 6.18. Gráfico de residuos vs porcentaje de la regresión lineal (normalidad).....	104
Figura 6.19. Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad).....	104
Figura 6.20. Gráfico de número de orden vs residuos t-Student de la regresión lineal (independencia).....	105
Figura 6.21. Histograma de frecuencias de la densidad obtenida con la medición en la cara, en kg/m ³	106
Figura 6.22. Histograma de frecuencias de la densidad obtenida con la medición en el canto, en kg/m ³	107
Figura 6.23. Histograma de frecuencias del valor medio de la fuerza de extracción entre la dirección tangencial y radial.....	108
Figura 6.24. Histograma de frecuencias de la profundidad de penetración media en mm.....	110
Figura 6.25. Histograma de frecuencias del módulo de elasticidad global al 12 % de humedad de la muestra.....	111
Figura 6.26. Recta de regresión entre el módulo de elasticidad local (ordenadas) y global(abcisas).....	113
Figura 6.27. Histograma de frecuencias de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica en la lectura directa testa-testa al 12 %.....	114
Figura 6.28. Recta de regresión lineal entre la velocidad de ultrasonidos de la lectura directa testa-testa y directa cara-cara.....	116
Figura 6.29. Histograma de frecuencias de la velocidad de propagación (m/s) de la onda de impacto en la lectura directa testa-testa al 12 %.....	117
Figura 6.30. Recta de regresión lineal entre la velocidad de la onda de impacto (m/s) de la lectura directa testa-testa (abcisas) y directa cara-cara (ordenadas).....	118
Figura 6.31. Histograma de frecuencias de la velocidad obtenida por vibración longitudinal .	119
Figura 6.32. Histograma de frecuencias módulo de elasticidad dinámico obtenido en flexión	120
Figura 6.33. Histograma de frecuencias del módulo de elasticidad dinámico obtenido por ultrasonidos.....	121
Figura 6.34. Histograma de frecuencias del módulo de elasticidad dinámico obtenido por onda de impacto.....	122
Figura 6.35. Histograma de frecuencias del módulo de elasticidad dinámico obtenido por vibración longitudinal.....	122
Figura 6.36. Histograma de frecuencias del módulo de elasticidad dinámico obtenido por vibración a flexión (o transversal).....	125
Figura 6.37. Histograma de frecuencias de la tensión de rotura (N/mm ²) de toda la muestra ..	126
Figura 6.38. Relación de Diámetro de Nudo Concentrado (CKDR, Concentrated Knot Diameter Ratio, Divos 2004).....	128
Figura A1.1. Disposición de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad global .	156
Figura A1.2. Disposición de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad local ...	157

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Algunas de las máquinas de ensayo a flexión	22
Tabla 3.2. Máquinas y tipos de ensayos que realizan.....	41
Tabla 5.1. Contenido medio de humedad en las cuatro mediciones	67
Tabla 5.2. Diferencia entre los valores medios de humedad medidos con xilohigrómetro y con estufa	68
Tabla 5.3. Especificaciones de la norma UNE 56544: 2011 para piezas de espesor ≤ 70 mm ...	70
Tabla 5.4. Especificaciones de la norma UNE 56544: 2011 para piezas de espesor > 70 mm...	71
Tabla 5.5. Rendimientos de clasificación visual de acuerdo a la norma UNE 56544: 2011 para una clase resistente inferior a C18.....	72
Tabla 5.6. Rendimientos de clasificación visual de acuerdo a la norma UNE 56544: 2011 considerando las probetas como de pequeña escuadría.....	72
Tabla 6.1. Rendimiento de clasificación según UNE 56544 - MEG y propiedades físico-mecánicas para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).....	90
Tabla 6.2. Rendimiento de clasificación según UNE 56544 - MEG y propiedades físico-mecánicas para clase resistente C18 o inferior (ClaseVgeB).....	91
Tabla 6.3. Rendimiento de clasificación según UNE 56544 – ME-1 y ME-2 y propiedades físico-mecánicas	92
Tabla 6.4. Rendimiento de clasificación y propiedades físico-mecánicas según para la calidad MEG (*) de la norma UNE 56544 sin considerar el parámetro de alabeo y para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA)	97
Tabla 6.5. Rendimiento de clasificación y propiedades físico-mecánicas según para la calidad MEG (*) de la norma UNE 56544 sin considerar el parámetro de alabeo y para clase resistente menor o igual que C18 (ClaseVgeB).....	98
Tabla 6.6. Valor medio y coeficiente de variación de la densidad local y global	102
Tabla 6.7. Valor medio y coeficiente de variación de la densidad obtenida mediante testigos.....	106
Tabla 6.8. Valor medio y coeficiente de variación de la fuerza de extracción.....	108
Tabla 6.9. Valor medio y coeficiente de variación de la profundidad de penetración con Pilodyn 6J	109
Tabla 6.10. Valor medio y coeficiente de variación del módulo de elasticidad global al 12% de humedad	111
Tabla 6.11. Valor medio y coeficiente de variación del módulo de elasticidad global y local	112
Tabla 6.12. Valor medio y coeficiente de la velocidad de propagación de ultrasonidos referida al 12% de humedad y medida de testa a testa	114
Tabla 6.13. Valor medio y coeficiente de variación de la velocidad de propagación de diferentes lecturas ultrasónicas en pino radiata de sección 80x120 mm	115

Tabla 6.14. Valor medio y coeficiente de la velocidad de propagación de onda de impacto referida al 12% de humedad y medida de testa a testa	116
Tabla 6.15. Valor medio y coeficiente de variación de la velocidad de propagación de diferentes lecturas de las ondas de impacto.....	117
Tabla 6.16. Valor medio y coeficiente de variación de la velocidad obtenida por vibración longitudinal.....	118
Tabla 6.17. Valor medio y coeficiente de variación módulo de elasticidad dinámico obtenido en flexión.....	119
Tabla 6.18. Valor medio y coeficiente de variación de los módulos de elasticidad estático y dinámicos de ultrasonidos, de la onda de impacto, de la vibración longitudinal y de la vibración transversal. $E_{din\ ult}$ y $E_{din\ imp}$ velocidad de testa a testa. Densidad rebanada al 12%	121
Tabla 6.19. Valor característico, valor medio y coeficiente de variación de la tensión de rotura.....	125
Tabla 6.20. Valor medio y coeficiente de variación de la nudosidad (CKDR).....	129
Tabla 6.21. Valor medio y coeficiente de variación de la tensión de rotura, el módulo de elasticidad global y la densidad.....	130
Tabla 6.22. Coeficientes de determinación de las relaciones lineales entre las propiedades físicas y mecánicas de la madera.....	131
Tabla A1.1. Valores medios del módulo de elasticidad global corregido al 12% de contenido de humedad	160

AGRADECIMIENTOS

Ante la dificultad de establecer un orden en los agradecimientos y ante el temor de olvidar a alguien, utilizaré un sistema tradicional en los créditos de las películas: el orden de aparición.

En primer lugar quiero expresar el agradecimiento a mi familia, en especial a Marga, mi esposa. Sin ellos, sin su esfuerzo, sin su apoyo, su paciencia y su colaboración, seguro que no estaría aquí.

En segundo lugar he de agradecer a la Escuela Politècnica Superior de la Edificación y al Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, en los que he desarrollado mi carrera docente durante los últimos 24 años, aprendiendo de tantos compañeros a los que no intentaré citar para no olvidarme injustamente de ninguno. Son muchos años y muchos compañeros.

En tercer lugar al Laboratorio de Materiales de la misma escuela, a todos los que en él trabajan y en algún momento nos han ayudado. Fue allí donde comenzó mi relación con el mundo de la madera en la construcción.

A continuación he de agradecer de forma muy especial la orientación, el apoyo en los momentos de desánimo y la gran cantidad de horas dedicadas por mis directores de Tesis, Dr. Francisco Arriaga y Dr. Jaume Avellaneda. Han sido capaces de sembrar en mí la semilla de la investigación. Gracias.

A todo el equipo de Unidad Docente de Cálculo de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la UPM por el apoyo y ayuda que siempre me han brindado y por los buenos ratos que hemos pasado.

A Rubén Plensa y Jordi Farràs, por que fue un placer trabajar con ellos durante la fase experimental.

Al Institut Català de la Fusta (INCAFUST). Gracias a ellos se pudo materializar esta Tesis. Sin la aportación de las 150 piezas hubiera sido difícil llegar hasta aquí. Y gracias por su apuesta por el pino radiata.

RESUMEN

El objeto de este trabajo de investigación es la determinación de las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus radiata* D. Don procedente de Cataluña, mediante métodos no destructivos, con la finalidad añadida de completar la base de datos de esta especie a nivel nacional.

Así mismo, en él se analiza la bondad de las técnicas no destructivas para la estimación de las propiedades mecánicas de la madera con la finalidad de su aplicación en la evaluación de estructuras existentes, así como en la clasificación de la madera nueva.

La muestra objeto del estudio estaba compuesta por 150 piezas de madera aserrada de dimensiones 80 x 120 x 2400 mm de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) procedente de Cataluña.

En primer lugar se realizó la clasificación visual de las piezas, de acuerdo a lo dispuesto por la norma UNE 56544:2011, registrándose todos los parámetros analizados que se utilizaron posteriormente para asignar las calidades visuales.

A continuación se realizaron diversos ensayos no destructivos: penetrómetro, arranque de tornillo, ultrasonidos, onda de impacto, análisis de vibraciones longitudinales y transversales, así como el medianamente destructivo: extracción de probetas testigo, con la finalidad de obtener valores de propiedades físicas y mecánicas que permitieran la clasificación de las piezas estudiadas.

Por último se realizaron los ensayos mecánicos (destructivos) que permitieron obtener los valores reales de cada pieza: módulo de elasticidad local y global, resistencia a flexión y densidad (UNE-EN 408:2011). Estos valores son los que permitieron la asignación de las propiedades mecánicas para la calidad visual de la madera y la determinación de la bondad de la predicción de las propiedades mediante ensayos no destructivos.

La clasificación visual de acuerdo con la norma UNE 56544 (calidad MEG), para una clase resistente igual o inferior a C18, dio lugar a un rechazo del 47 % y de un 73 % para una clase resistente superior a C18, siendo el alabeo, en ambos casos, la causa principal de estos elevados valores de rechazo.

La muestra es de gran escuadría, elegida con una anchura de la sección muy próxima a la frontera entre a pequeña y la gran escuadría marcada por la norma, 70 mm. Con el fin de contrastar los resultados de ambos criterios de clasificación (pequeña y gran escuadría) se clasificó la muestra, también, como si se tratase de madera de pequeña escuadría, obteniéndose unos rendimientos de un 3 % como ME-1, 42 % como ME-2 y un rechazo del 55 %. Se observa que el porcentaje de rechazo es mayor que para una clase resistente igual o inferior a C18 y menor que para una clase resistente superior a C18. La presencia de la calidad ME-1 es tan solo del 3 % lo que implica que no compensa diferenciar dos calidades (ME-1 y ME-2).

La aplicación de técnicas no destructivas junto a la medianamente destructiva (extracción de probetas testigo) permitieron confirmar un alto grado de precisión, lo que unido a su portabilidad y su facilidad de uso las convierte en muy apropiadas para la estimación de las

propiedades resistentes de la madera aserrada estructural tanto en estructuras existentes como en madera nueva.

Algunos de los mejores valores de estimación conseguidos son los siguientes:

Coefficientes de determinación R^2 de 0,88, para la densidad obtenidos mediante la extracción de probetas testigo.

Coefficientes de determinación R^2 de 0,86, para el módulo de elasticidad obtenido mediante análisis de vibración transversal, aunque para madera puesta en obra este ensayo no se puede utilizar, por lo que el valor sería algo inferior, 0,82, obtenido mediante ultrasonidos.

Coefficientes de determinación R^2 de 0,54 para la resistencia, obtenido mediante análisis de vibración transversal, como en el caso anterior, para madera puesta en obra este ensayo no se puede utilizar, por lo que el valor sería algo inferior, 0,46, obtenido mediante ultrasonidos.

Como se puede apreciar, estos valores permiten prever un futuro prometedor como herramientas no destructivas para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural tanto en estructuras existentes como en madera nueva, especialmente combinándolas con la clasificación visual.

RESUM

L'objecte d'aquest treball de recerca és la determinació de las propietats mecàniques de la fusta de *Pinus radiata* D. Don, procedent de Catalunya, mitjançant mètodes no destructius, amb la finalitat afegida de completar la base de dades d'aquesta espècie a nivell nacional.

Tanmateix, en el se analiza la adequació de les tècniques no destructives per a l'estimació de les propietats mecàniques de la fusta amb la finalitat de la seva aplicació en l'avaluació d'estructures existents, així com en la classificació de la fusta nova.

La mostra objecte de l'estudi estava formada per 150 peces de fusta serrada de dimensions 80 x 120 x 2400 mm de pi radiata (*Pinus radiata* D. Don) procedent de Catalunya.

En primer lloc, es va realitzar la classificació visual de les peces, d'acord amb el què disposa la norma UNE 56544:2011, registrant-ne tots els paràmetres analitzats que posteriorment es van utilitzar per a assignar les qualitats visuals.

A continuació es van realitzar diversos assaigs no destructius; penetròmetre, arrencament de cargol, ultrasons, ona d'impacte, anàlisi de vibracions longitudinals i transversals, així com el mitjanament destructiu; extracció de provetes testimoni, amb la finalitat d'obtenir valors de propietats físiques i mecàniques que permetessin la classificació de les peces estudiades.

Per últim es van realitzar els assaigs mecànics (destructius) que van permetre obtenir els valors reals de cada peça: mòdul d'elasticitat local i global, resistència a flexió i densitat (UNE-EN 408:2011). Aquests valors són els que permeteren l'assignació de les propietats mecàniques per a la qualitat visual de la fusta i la determinació de la bondad de la predicció de les propietats mitjançant assaigs no destructius.

La classificació visual d'acord amb la norma UNE 56544 (qualitat MEG), per a una classe resistent igual o inferior a C18, va donar lloc a un rebuig del 47 % i d'un 73 % per a una classe resistent superior a C18, essent el guerxament en ambdós casos, la causa principal d'aquests elevats valors de rebuig.

La mostra és de gran escairada però es va escollir amb una amplada de la secció molt propera a la frontera etre a petita i la gra escairada marcada per la norma, 70 mm. Amb la finalitat de contrastar els resultats d'ambdós criteris de classificació (petita i gran escairada es va classificar la mostra, també, com si es tractés de fusta de petita escairada, obtenint-se uns rendiments d'un 3 % com ME-1, 42 % com ME-2 i un rebuig del 55 %. S'observa que el percentatge de rebuig es major que per una classe resistent igual o inferior a C18 i menor que per a una classe resistent superior a C18. La presència de la qualitat ME-1 és tant sols del 3% el que implica que no compensa diferenciar dues qualitats (ME-1 i ME-2).

L'aplicació de tècniques no destructives junt a la mitjanament destructiva (extracció de provetes testimoni) permeteren confirmar un alt grau de precisió, el que junt amb la seva portabilitat i la seva facilitat d'ús les converteix en molt apropiades per a l'estimació de les propietats resistents de la fusta serrada estructural tant en estructures existents com en fusta nova.

Alguns dels millors resultats d'estimació aconseguits són els següents:

Coefficients de determinació R^2 de 0,88, per a la densitat, obtinguts mitjançant l'extracció de provetes testimoni.

Coefficients de determinació R^2 de 0,86, per el mòdul d'elasticitat obtingut mitjançant anàlisi de vibració transversal, tot i que per a fusta posada a obra aquest assaig no es pot utilitzar, pel que el valor seria una mica inferior, 0,82, obtingut mitjançant ultrasons.

Coefficients de determinació R^2 de 0,54 per a la resistència, obtingut mitjançant anàlisi de vibració transversal, com en el cas anterior, per a fusta posada a obra aquest assaig no es pot utilitzar, pel que el valor seria una mica inferior, 0,46, obtingut mitjançant ultrasons.

Como es pot apreciar, aquests valors permeten preveure un futur prometedor com a eines no destructives per a l'estimació de les propietats resistents de la fusta serrada estructural tant en estructures existents com en fusta nova, especialment combinant-les amb la classificació visual.

SUMMARY

The aim of this research work is the determination of the mechanical properties of timber of *Pinus radiata* D. Don from Catalonia, by means of non-destructive methods, with the secondary aim of completing the national database of this species.

Moreover, the prediction capacity of non-destructive techniques for the estimation of mechanical properties of timber is analyzed in order to evaluate its application to the assessment of existing structures and, also, in the structural grading of new timber.

The studied sample was constituted by 150 sawn timber pieces of 80x120x2400 mm dimensions of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) from Catalonia.

Firstly, the pieces were visually graded according to the Spanish standard UNE 56544:2011, recording all analyzed parameters that were used for the assignment of visual grades.

Then, some non-destructive tests were carried out; probing, screw withdrawal, ultrasound waves, stress waves, longitudinal and bending dynamic analysis of vibrations, and semi-non-destructive tests; drill core specimens, with the same objective, for the determination of physical and mechanical properties for stress grading of timber pieces.

Finally, mechanical tests (destructive tests) were carried out (UNE-EN 408:2011), obtaining the actual mechanical and physical values for each piece: local and global modulus of elasticity in bending, bending strength, and density. These values were used for assignment of mechanical properties for the visual grade of the timber and the determination of the aptitude for the prediction of mechanical properties by means of non-destructive testing.

The visual grading according to the UNE 56544 standard (MEG grade), for a strength class equal or less to C18, gives a reject percentage of 47 % and a 73 % for a strength class superior to C18. In both cases the twist is the main reason for these high reject percentages.

The studied sample is large cross-section timber pieces but the width of the cross-section was selected close to the border value between small and large cross-section of the standard, 70 mm. In order to contrast the results of both grading criteria (small and large cross-section), the pieces were also graded as if they were small cross-section timber pieces, obtaining outputs of 3 % for ME-1, 42 % for ME-2 and a reject percentage of 55 %. The reject percentage was higher than the percentage obtained for a strength class of at most C18 and less than the reject percentage for a strength class superior to C18. The presence of ME-1 grade is only 3 % which means that it is not worthwhile to differentiate between two grades (ME-1 and ME-2).

The use of non-destructive techniques together with the semi-non-destructive technique (drill cores) presented good results for prediction. This aptitude together with its portability and easy use allow to consider them as very adequate techniques for the estimation of strength properties of sawn timber in existing structures and in new timber.

Some of the best results for prediction were the following:

Determination coefficients $R^2 = 0,88$ for the density by means of the core drilling specimens.

Determination coefficients $R^2 = 0,86$ for the modulus of elasticity by means of bending dynamic vibration analysis. But this technique can not be used in situ, and then the determination coefficient is limited to 0,82 obtained by means of ultrasounds.

Determination coefficients $R^2 = 0,54$ for the modulus of rupture by means of bending dynamic vibration analysis, as in previous case. But this technique can not be used in situ, and then the determination coefficient is limited to 0,46 obtained by means of ultrasounds.

These results show a promising future for the non-destructive tools in the estimation of mechanical properties of structural sawn timber both in existing structures and in new timber structures, mainly combined with visual grading.

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

Esta tesis utiliza como material de estudio la madera de pino radiata (*Pinus radiata D. Don*). El interés por esta especie vino dado al descubrir algunas de sus características. Se trata de una madera de crecimiento rápido, con un gran rendimiento y a pesar de ello con unas propiedades físico-mecánicas que la hacen adecuada para su uso en construcción.

Esta especie ya había sido estudiada en España, pero solamente la procedente del País Vasco y antes de comenzar la tesis surgió la posibilidad de estudiar el pino radiata procedente de Cataluña, crecido en un clima mediterráneo, con unas condiciones diferentes a los estudiados hasta el momento, lo que generaba unas incógnitas sobre sus propiedades que se podría intentar resolver con la tesis.

En España el sector de la edificación está regulado a nivel normativo por la Ley de Ordenación de la Edificación LOE, que nos remite al Código Técnico de la Edificación, CTE, el cual en su Capítulo 1, Disposiciones generales, Artículo 1, Objeto, Apartado 1 establece:

El Código Técnico de la Edificación es el marco normativo que regula las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, en desarrollo de lo previsto en la disposición adicional segunda de la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación, (LOE).

Así mismo, en el Apartado 4 indica:

Las exigencias básicas deben cumplirse en el proyecto, la construcción, el mantenimiento y la conservación de los edificios y sus instalaciones.

En el caso de la madera, unas de las exigencias para cumplir con los requisitos básicos son las que recoge el Documento Básico SE-M. Seguridad estructural. Madera.

El documento nos indica cuales son las clases resistentes que podemos utilizar para construir con madera estructural. En madera aserrada: C14, C16,..., C45, C50 para coníferas y chopo y D30, D35,..., D70 para las frondosas.

Es en este punto donde comienzan algunos de los problemas a la hora de construir con madera. En primer lugar ¿Como se asignan las clases resistentes a las maderas para uso estructural? La asignación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera para uso estructural nueva se puede realizar mediante distintas técnicas. En primer lugar, la más habitual, mediante la clasificación visual. En segundo lugar, mediante la clasificación por métodos que se basan en pruebas mecánicas, acústicas y algunas otras técnicas que se explicarán a lo largo de este trabajo.

Aquí es donde se centra una parte importante del trabajo. Clasificar madera nueva de pino radiata mediante todas las técnicas a las que se ha tenido acceso.

Otro aspecto relacionado con lo anterior es la necesidad de que la madera aserrada estructural vaya acompañada del marcado CE. La obligatoriedad en la exigencia de dicho marcado se ha ido retrasando en sucesivas ocasiones pero ya se ha fijado como fecha definitiva el 1 de octubre de 2012. Esta obligatoriedad del marcado CE presentará problemas de suministro de madera nacional puesto que en España son muy pocos los aserraderos capacitados para esta labor. Este trabajo puede resultar útil a aquellos que estén interesados en introducirse en el mundo de la clasificación de madera para uso estructural.

Intervención en obra existente. Cuando se ha de intervenir en obra existente la incógnita sobre las propiedades físico-mecánicas de la madera que conforma la estructura sobre la que se va a intervenir es similar a la madera nueva. Pero con la dificultad añadida de que no se pueden utilizar los sistemas de clasificación para madera nueva, por lo que se deberá recurrir a otras técnicas. Estas técnicas están basadas en ensayos no destructivos a los que se pueden complementar con la información obtenida mediante la observación-clasificación visual de la madera, pero siempre con limitaciones por estar colocada en obra, como por ejemplo que no sea observable en todas sus caras ni generalmente en sus extremos, al estar casi siempre empotrados en las paredes del edificio.

La utilización de las técnicas no destructivas en la clasificación de madera nueva, además de ayudar a su clasificación, pretendía analizar la viabilidad y fiabilidad para su aplicación en los trabajos de diagnosis en estructuras existentes.

En un momento de crisis en el campo de la construcción, el sector vuelve sus ojos hacia la rehabilitación. Y es aquí donde nos encontramos con la presencia de gran cantidad de estructuras de madera que se han de peritar. Los ensayos no destructivos serán extraordinariamente útiles a la hora de acometer estos trabajos.

La sostenibilidad y el medio ambiente están adquiriendo una importancia cada vez mayor en todas las actividades humanas y por tanto, también, en el mundo de la construcción. La tendencia a reducir los costes energéticos, la producción de CO₂, la disminución de residuos, están logrando colocara la madera en una posición privilegiada siempre y cuando la madera cumpla con todos los requisitos medioambientales.

Todo aquello que facilite el uso de la madera sustituyendo a otros materiales que tienen un alto coste energético de fabricación, con problemas de reciclado y con producciones elevadas de CO₂, debería ser considerado como un camino hacia el futuro con éxito.

CAPÍTULO 2:

OBJETIVOS

Los objetivos principales de esta tesis son los dos siguientes:

- Determinación de las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus radiata* D. Don procedente de Cataluña, con la finalidad añadida de completar la base de datos de esta especie a nivel nacional. En la actualidad las muestras ensayadas proceden del País Vasco, exclusivamente.
- Estudio de la bondad de los métodos no destructivos para la estimación de las propiedades mecánicas de la madera con la finalidad de su aplicación en la evaluación de estructuras existentes, así como en la clasificación de la madera nueva.

Para ello se procedió, en primer lugar, a la realización de los ensayos no destructivos. A continuación se realizó la clasificación visual de las piezas. Por último se evaluaron las propiedades resistentes mediante el ensayos mecánicos de flexión hasta la rotura. De esta manera se pudieron contrastar los valores estimados mediante las diversas técnicas; no destructivos y clasificación visual, con los valores obtenidos al ensayar las piezas hasta la rotura

Además, pueden incluirse los objetivos que a continuación se relacionan y que lógicamente, pueden considerarse derivados de los anteriores o incluso pasos intermedios para llegar a ellos.

- Implementación y puesta en marcha del Laboratorio de Materiales de la EPSEB-UPC en el campo de los ensayos de caracterización estructural de la madera aserrada en tamaño comercial, así como en la aplicación de las técnicas no destructivas mediante equipos portátiles que permiten su empleo en obra.
- Contraste crítico de la norma española de clasificación visual de la madera de coníferas con uso estructural (UNE 56544). Se ha elegido una escuadría de madera que se encuentra ligeramente por encima del límite para la madera denominada de gran escuadría (grueso ensayado de 80 mm). Hasta el momento, las escuadrías ensayadas en madera de pino radiata de gran escuadría han sido muy superiores (gruesos de 150 a 200 mm). La elección de esta dimensión próxima a la frontera entre la pequeña y gran

escuadría, 70 mm, permitirá analizar la idoneidad de la elección de la misma para esta especie.

- Estudiar la predicción de las propiedades mecánicas mediante la técnica de análisis de vibraciones transversales o de flexión, para comparar sus resultados con los de la vibración longitudinal (empleada previamente en la misma especie).
- Estudiar la estimación de la densidad de la pieza de madera mediante técnicas no destructivas ya utilizadas anteriormente (penetrómetro y arranque de tornillo) así como con nuevos procedimientos (testigos) que permitan mejorar la predicción de la densidad.
- Contrastar las correlaciones entre propiedades mecánicas y parámetros obtenidos mediante técnicas no destructivas con las que se han obtenido para esta especie de otras procedencias. Esto permitirá constatar si las correlaciones son paralelas dentro de una especie o difieren en el mismo grado que se da para otras especies.

CAPÍTULO 3:

ANTECEDENTES

3.1. Madera Estructural: madera de pequeña y gran escuadría

3.1.1. Probetas de pequeña dimensión frente a probetas de tamaño estructural

La madera no es un material homogéneo. El estar formada principalmente por fibras orientadas en la dirección de crecimiento del árbol, así como la presencia de particularidades (también denominadas defectos por algunos autores) como son los nudos, la inclinación de las fibras, gemas, fendas, etc., la convierten en un material heterogéneo y anisótropo.

Las propiedades mecánicas de la madera se estudiaban antiguamente mediante el uso de probetas libres de defectos, por lo que las probetas que se usaban eran de pequeñas dimensiones para evitar la presencia de estas singularidades que afectaban su comportamiento.

Hasta la década de los 70 del siglo pasado se trabajaba con estas probetas de pequeñas dimensiones de 20 x 20 mm de sección y longitudes de hasta 300 mm (UNE 56537:1979).

Los cálculos de las estructuras de madera se realizaban de acuerdo a las tensiones admisibles del material. Estas tensiones admisibles o resistencias se obtenían a partir de un percentil (normalmente el 5 %) de la distribución normal de la resistencia al que se aplicaban una serie de ajustes por la duración de la carga, la humedad, la altura de la sección, la calidad y el coeficiente de seguridad global.

A partir del final de dicha década comenzó a ponerse en duda la validez de los trabajos realizados con probetas de pequeñas dimensiones para predecir los valores mecánicos de la madera de tamaño estructural. Gracias a los trabajos del profesor Madsen (Madsen 1986, 1992) se observó que los resultados obtenidos con las probetas de pequeña dimensión no coincidían con los valores reales de las piezas de tamaño estructural.

Cuando se preparan las probetas de pequeñas dimensiones se han de extraer de zonas del tronco en las que las fibras son rectas y se ha de evitar la presencia de defectos en las mismas. En el caso de la preparación de probetas de tamaño estructural resulta prácticamente imposible que estén libres de defectos y que la fibra sea completamente recta debido a la presencia de las singularidades (o defectos), especialmente los nudos que son los causantes de las desviaciones de las fibras al rodearlos.

La duración de la carga es otro de los factores importantes a tener en cuenta a la hora de valorar las propiedades mecánicas de la madera estructural. La relación entre la resistencia y la duración de la carga fue estudiada por Wood y expresada mediante la denominada curva de Madison (Wood 1951), que era muy conservadora con las cargas con duración inferior a un año yendo en contra de la seguridad para cargas de duración mayor, figura 3.1.

En el procedimiento actual de cálculo según el Eurocódigo 5, se utiliza una corrección de la resistencia más adaptada a la madera de tamaño estructural. En la misma figura se ha superpuesto, sobre la curva de Madison, la curva adoptada por el Eurocódigo 5 (UNE EN 1995-1-1. Eurocódigo 5) que permite apreciar la diferencia entre ambas (Arriaga et al. 2007).

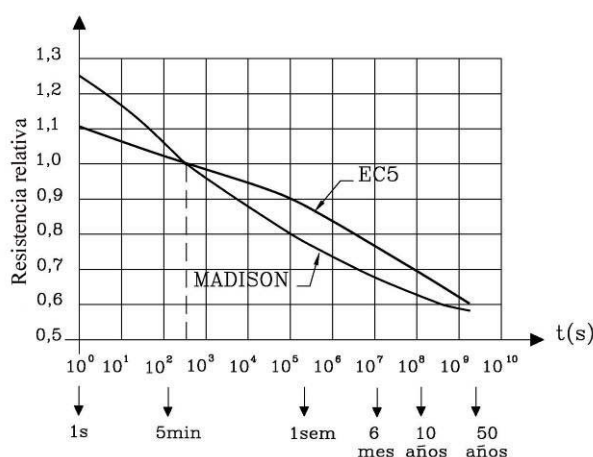


Figura 3.1. Relación entre resistencia y duración de la carga. Curva de Madison y curva adoptada en el Eurocódigo 5 (Arriaga et al: 2005).

Por otro lado, la influencia de la humedad en la resistencia es apreciable para percentiles superiores al 40 %, pero por debajo de dichos percentiles deja de ser significativo. Para el 5º percentil y con contenidos de humedad por debajo del 20 % su influencia es despreciable. En la rotura de las piezas más débiles, que definen el 5º percentil, los defectos de las piezas tienen una influencia muy superior al del contenido de humedad.

En el sistema de probetas de pequeña dimensión y libres de defectos el parámetro de la calidad de la madera se introducía mediante la aplicación de factores de corrección de la resistencia que era común para casi todas las especies lo cual suponía una simplificación que se alejaba de los valores reales y que trabajos posteriores han demostrado que el procedimiento no era muy preciso (Madsen 1992).

Actualmente la caracterización de la madera estructural se realiza con ensayos con madera de tamaño estructural. En Europa los ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas se realizan utilizando con la norma EN 408:2011, la estimación de los valores característicos de acuerdo con la norma EN 384:2010 y la clasificación visual según la norma marco EN 14081-1:2006.

Los valores característicos de las propiedades mecánicas que se obtienen para cada calidad quedan asignados en un sistema de clases resistentes definido en la norma EN 338:2010.

3.1.2. Particularidades de las piezas de gran escuadría

La mayor parte de normas de clasificación están orientadas a piezas con secciones de tamaños relativamente pequeños, gruesos de 35 a 100 mm y anchuras de sección de 100 a 200 mm).

Las normas actuales de clasificación visual dentro del ámbito de la Unión Europea para madera de coníferas son las siguientes:

La alemana DIN 4074-1:2008, la británica BS 4978:2007, la francesa NF B 52001, la nórdica INSTA 142:2009 y la española UNE 56544:2011.

De momento son las normas DIN 4074-1:2008 y UNE 56544:2011 las únicas que contemplan la madera de gruesa escuadría

Se estaba produciendo una situación anormal; la normativa solo contemplaba las pequeñas escuadrías y el mercado necesitaba también regulación para piezas de dimensión superior a los 70x200 mm, tamaño máximo que contemplaba nuestra norma hasta la aparición de la versión de 2007. Los aserraderos estaban suministrando cantidades importantes de madera de gran escuadría, tanto para obra nueva, como para el campo de la restauración o mantenimiento de edificios antiguos que quedaba fuera de la norma.

La madera de gran escuadría presenta algunas particularidades respecto a la de pequeña escuadría. Las fendas y las gemas tienen una presencia y relevancia de la que carecen en la pequeña escuadría debido a los problemas de secado (fendas) y a los inherentes a sus dimensiones (gemas). Al aplicar los criterios habituales en las pequeñas escuadrías el número de piezas rechazadas aumentaría de forma importante y en cambio la disminución de las propiedades mecánicas no acompañaría a esa proporción de rechazo. Sobre la influencia de gemas y fendas se han realizado estudios que cuantifican su influencia (Arriaga et al. 2007b, Esteban et al. 2010).

También la presencia de médula y de madera juvenil, habituales en las piezas de gran escuadría haría inviable su utilización para la mayoría de las normas antes citadas. Otra posibilidad, en las piezas de gran escuadría, es la de poder encontrar defectos internos, no visibles desde el exterior.

Además de métodos de clasificación visual existen otras técnicas o métodos de clasificación mecánica que se explican en este mismo capítulo. Se trata de métodos rápidos y más fiables que la clasificación visual al desaparecer la subjetividad del clasificador.

El inconveniente que presentan estos métodos es que están limitados a piezas de grosores inferiores a los 70-100 mm por lo que no son aplicables a la mayor parte de las piezas de gran escuadría.

Cuando la clasificación se quiere aplicar a piezas de gran escuadría en edificios existentes el problema se agrava ya que a los problemas propios del tamaño hay que añadir que en muchos casos la sección de la pieza no es constante en toda la longitud de la misma y además no suele ser posible acceder a las cuatro caras de la pieza. Todo esto hace que el intentar clasificar madera de gran escuadría en obra existente sea mucho más complejo y sus resultados mucho más variables que en madera nueva.

3.1.3 Efecto del tamaño

La resistencia de la madera esta relacionada con el tamaño de la pieza. Se han realizado numerosos trabajos y experiencias desde la segunda década del siglo pasado.

Los primeros trabajos los realizaron Newlin y Trayer en 1924, estudiando la relación entre la resistencia a flexión y la altura de la sección, llegando hasta alturas de 300 mm (Newlin 1924). Dawley y Youngquist continuaron investigando, llegando a alturas hasta 400 mm. Las conclusiones de estos trabajos fueron publicadas por Freas y Selbo y sus conclusiones fueron tenidas en cuenta para la normativa de cálculo en los Estados Unidos como factor de altura en el ajuste de la resistencia a flexión (Freas et al. 1954).

Todos estos trabajos se basaban en la influencia de la altura del canto de la pieza. A partir de 1939 Weibull propone una teoría sobre el efecto del tamaño fundamentada en la concepción estadística de la resistencia, basada en que es mucho más probable que exista una zona de baja resistencia en una pieza de gran volumen frente a una de pequeño volumen (Weibull 1939). Se denomina la teoría del eslabón más débil y supone que el fallo de una pieza se produce cuando la tensión supera la resistencia del elemento más débil incluido en ella.

Esta teoría se aplicó por primera vez a la madera en 1966 (Bohanan 1966). Barret comprobó el efecto del tamaño en la resistencia (Barret 1974).

En las piezas sometidas a tracción el esfuerzo se puede considerar constante a lo largo de la pieza por lo que en cualquier sección la tensión será la misma, por tanto el fallo se producirá en la zona más débil, que normalmente estará relacionada con la presencia de nudos, la desviación y discontinuidad de las fibras que producirán un aumento local de tensión.

La madera sometida a flexión presenta una situación más compleja. La ley de momentos flectores es variable a lo largo de la pieza localizándose los valores máximos en zonas concretas de la misma, no a todo lo largo de la pieza como en el caso anterior.

En la madera sometida a flexión la distribución de tensiones da lugar a una ley triangular en la que los valores máximos están muy localizados, en las fibras extremas de la pieza, por lo que la probabilidad de que los defectos críticos coincidan en estas zonas es más baja y más cuanto menor sea el volumen de la pieza.

En el caso de las piezas sometidas a compresión la influencia del tamaño es muy inferior a los casos de tracción y flexión.

Madsen y Barret resumieron los resultados obtenidos en varios trabajos de investigación respecto al efecto del tamaño, estableciendo unos coeficientes de corrección de los resultados en función del tamaño de las piezas de donde proceden los que actualmente aplican las distintas normativas (Madsen 1986, 1992, Barret 1974, 1990).

Estos autores deducían un efecto del tamaño de la pieza que dependía de la sollicitación y de alguna de las dimensiones de la misma. La corrección o ajuste de la resistencia se propone a través de un coeficiente determinado por la relación entre una dimensión de referencia y la dimensión concreta de la pieza, elevado a un exponente, g ; este exponente se denomina parámetro del efecto de tamaño.

Para el efecto de la longitud la resistencia a flexión proponen un valor de $g = 0,17$ a $0,20$. Para el efecto de la longitud en la tracción paralela a la fibra proponen un valor de $g = 0,18$ y para la altura se sugiere un valor de $0,10$.

El Eurocódigo 5 y el DB de Seguridad Estructural del CTE solo consideran el efecto tamaño en las resistencias a flexión y tracción paralela a la fibra con un parámetro dependiente a la altura de $g = 0,20$ en madera maciza.

En las especies españolas se ha estudiado el efecto tamaño para el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) obteniendo para flexión unos valores similares a los de las investigaciones anteriormente citadas dando para la altura un valor de $g = 0,20$ (Hermoso 2002). También se ha analizado la influencia del efecto tamaño en el pino laricio - *Pinus nigra* subs. *Salzmanii* (Dunal) Franco (Fernández-Golfín 2002). El parámetro del efecto de altura g para esta especie resultó bastante más alto que para el pino silvestre, dando un valor de $g = 0,51$.

3.2 La madera de pino radiata para uso estructural

El pino radiata es una especie arbórea que pertenece a la clase de las coníferas, de la familia de las pináceas, género *Pinus*. Su nombre científico es *Pinus radiata* D. Don y proviene del botánico escocés David Don. También se le conoce como pino insignis, pino insigne o pino de Monterrey.

El área natural de localización del pino radiata es extremadamente reducida en la actualidad, limitándose a tres enclaves en la costa californiana (Swanton, Monterrey y Cambria) y dos en las islas mejicanas de Guadalupe y Cedros (Vignote 1984).

Actualmente se encuentra en grandes masas forestales en Chile con más de 1,4 millones ha, Nueva Zelanda con más de 1,2 millones ha, Australia con más de 600.000 ha y España con 231.312 ha (EFE50, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

En España el pino radiata lo introdujo Carlos Adán de Yarza en 1840 que plantó los primeros ejemplares en su parque botánico de Zubieta (Lekeitio, Vizcaya), pero fue a partir de 1870 cuando se comenzó a impulsar su aprovechamiento. Se trata de una especie forestal de rendimiento elevado a corto plazo; su rentabilidad permite entender el favor de que gozó entre los propietarios forestales tratándose una inversión segura al no necesitar de labores y atenciones especiales. En los siguientes años se extendió a otras zonas del territorio vasco.

En nuestro país se localiza, actualmente, en la Cornisa Cantábrica, con especial incidencia en Galicia y el País Vasco, donde se concentran las dos terceras partes de todas las masas forestales de pino radiata. Podemos encontrar también plantaciones de pino radiata en las Comunidades Autónomas de Asturias, Cantabria, Castilla, Cataluña, Canarias, León y Navarra, figura 3.2.

Respecto a sus características botánicas y morfológicas se puede observar que los brotes de primavera son multinodales, agrupando las ramas en uno o más verticilos. Las hojas son aciculares y están agrupadas, predominantemente, en fascículos de tres. Tienen longitudes de entre 7 y 18 cm y persisten verdes de dos a cuatro años, dando a la copa un aspecto muy denso.

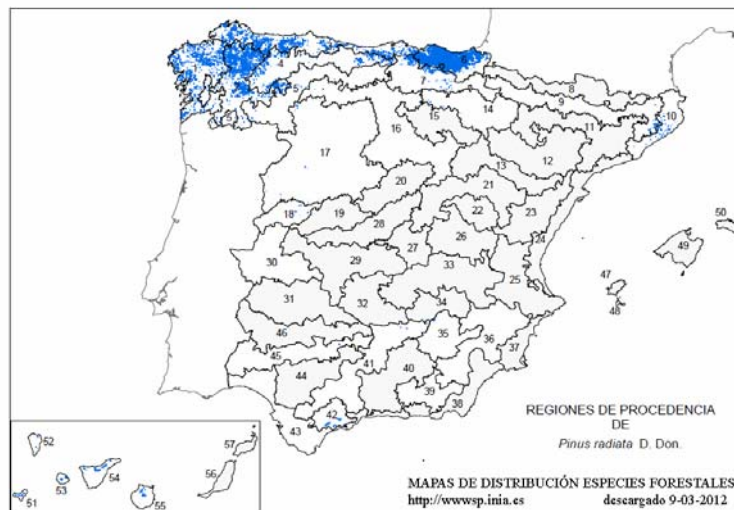


Figura 3.2 Distribución del pino radiata en España (INIA)

El aspecto del árbol varía según la densidad del bosque en que se haya desarrollado. En densidades normales, las copas son estrechas y puntiagudas. Luego, dejan de crecer en altura y tienden a ensancharse. Si por el contrario el pino ha crecido aislado o en masas abiertas, el árbol pierde pronto la guía principal, desarrolla ramas gruesas y largas y forma una copa grande, con altura variable, que puede empezar muy cerca del terreno.

Debido a la corta vida de este árbol es muy difícil encontrar ejemplares de diámetros superiores al metro ya que no suele durar más de 100 años en sus bosques naturales.

Los árboles adultos presentan una corteza rugosa y gruesa que puede llegar a 8 cm. Las raíces principales que sostienen el árbol están situadas a 60 cm de profundidad. Para mejorar la resistencia al viento, pueden extenderse hasta distancias de 12 m, mezclándose con las de otros árboles (Ruiz de la Torre 1979, Collardet 1988, Moro, 2002).

Es una especie muy sensible al frío y a las heladas, prefiere climas suaves, litorales con abundante humedad atmosférica. Aguanta bien el viento. Le gustan los suelos arenosos, ácidos y profundos. Fuera de sus condiciones óptimas se vuelve muy sensible a la procesionaria del pino.

En cuanto a sus características físico-mecánicas podemos decir que son similares a las del resto de las coníferas, y eso la hace muy apreciada para la industria de carpintería y mueble, para la industria del embalaje y la pasta mecánica, y actualmente para las estructuras de madera, especialmente para madera laminada y contralaminada. En España, concretamente es en el País Vasco donde actualmente se concentra la mayor parte de industrias transformadora.

Uno de los indicadores de la calidad de la madera más utilizado es el grueso de los anillos de crecimiento. En general, se entiende que cuanto más estrecho es el anillo, mejor calidad de madera porque presenta una mayor densidad. Este hecho, general en el conjunto de las coníferas, debe ser matizado en el caso del pino radiata cuya diferencia de densidades entre la madera de verano y la de primavera, ambas dentro del anillo anual de crecimiento, es muy reducida

(cociente de densidades de 1,57) mientras que en el abeto el cociente toma el valor de 2,31 y en la píceas de 1,73 (Fernández-Golfín 1994, 1996a, 2008).

Su madera presenta un alto grado de homogeneidad y un buen comportamiento mecánico, aunque el tamaño de su anillo de crecimiento sea superior a 6,5 mm de media.

La madera de la albura es de color entre blanco y blanco amarillento, que se oscurece con la luz de forma relativamente rápida, y el duramen tiene un color pardo amarillento o amarronado.

Por otra parte, la forma del tronco, recto en la mayoría de los pinares de esta especie, permite la obtención de longitudes de tala importantes. Esto sitúa a la madera del pino radiata en una posición muy ventajosa para su utilización en la construcción respecto al resto de pinos comunes.

La duración natural de la madera es similar a la del resto de los pinos, es decir, baja. Sin embargo, las piezas donde predomina la albura son susceptibles a mejorar mediante la aplicación de tratamientos químicos, tanto en verde como en seco, pues ésta, a diferencia del duramen, es relativamente impregnable.

Los posibles inconvenientes para su uso se derivan de la presencia de defectos que pueden afectar su rigidez y la resistencia mecánica. En este sentido, la presencia y tamaño de los nudos y especialmente las deformaciones, cobran una gran importancia.

La madera de pino radiata ha sido ampliamente estudiada a lo largo de los últimos 30 años tanto en el mundo como en España.

En España el primer trabajo de investigación sobre las propiedades físico-mecánicas de pino radiata sobre probetas libres de defectos se realizó a mediados de la década 1980 (Vignote 1983, 1984). Poco después, se acometió su estudio con la, entonces reciente, normativa que analizaba sus propiedades en tamaño estructural (Seoane 1989).

De esta manera, la madera aserrada de pino radiata se convertía en la primera estudiada de forma sistemática y la más analizada a lo largo del tiempo. Entre 1985 y 1988 se llevaron a cabo varios trabajos de investigación entre el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y el Centro Técnico de la Madera del País Vasco (ZTB), para la caracterización estructural de esta especie. Este trabajo incluía, no sólo la caracterización físico-mecánica de la madera, sino también la tecnológica, la anatómica y la biológica (Fernández-Golfín 1996a, 1996b, 2008).

Existen otros trabajos de investigación que dieron lugar a tesis doctorales y otras publicaciones orientadas principalmente hacia un tipo de investigación anatómica-biológica (Apiolaza 2000, Canga, 1998, Cown 1999, Crecente-Campo 2008, González Ávila 2005, Matheson, 2002, 2008, Ivkovic 2009) o con un carácter más geográfico e histórico (Chauchard 2000, Rodríguez 2003).

Los últimos trabajos publicados sobre el pino radiata en nuestro país son: en pequeña escuadría los de Hermoso (Hermoso 2007a, 2007b), para gran escuadría los de Iñiguez, que propiciaron la inclusión de la gran escuadría en la norma UNE 56544:2007 (Iñiguez 2005, 2007b), madera contrachapada de pino radiata (Arriaga et al. 2008) y por último, por parte de Fernández-Golfín, una recopilación de los 25 años de trabajos con el pino radiata (Fernández-Golfín, 2008).

Observando la utilización del pino radiata en aquellos países con mayores superficies plantadas y mayor tradición en su uso, como son Chile y Nueva Zelanda, así como los edificios más recientes en nuestro país, se puede prever que el futuro de esta madera está en el uso de productos transformados como la madera laminada y contralaminada para uso estructural. Mediante el uso de estos productos transformados se minimizan algunos de los problemas de esta madera, como pueden ser las deformaciones, así como se pueden obtener piezas de dimensiones muy superiores a las que las que permite la madera aserrada.

Recordamos que se conoce como madera laminada a los elementos estructurales formados por encolado de láminas de madera todas ellas con orientadas en la dirección paralela al eje de las láminas. Generalmente están por un número impar de láminas con espesores entre 6 y 45 mm. En cuanto a los paneles contralaminados, están formados por varias capas de madera aserrada, encoladas entre sí, de forma que la orientación de las fibras de dos capas contiguas es perpendicular entre ellas.

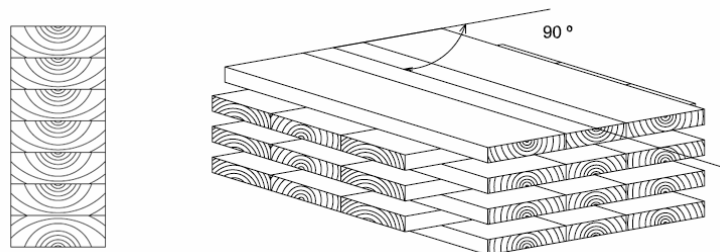


Figura 3.3. Madera laminada y tablero de madera contralaminada (Arriaga, 2009)

La utilización de piezas encoladas permite superar algunas limitaciones de esta especie, como pueden ser las deformaciones de las piezas, como se verá en los resultados del trabajo.

A continuación se incluyen algunos ejemplos recientes de edificios y puentes realizados con madera de pino radiata en distintos países entre los que se pueden ver algunos ejemplos del uso de laminada y contralaminadas.

Edificios con estructura de madera laminada.



Figura 3.4. Frontón Ermitaberri. Arquitectos: IA+B Arkitektura. Zeberio, Vizcaya. 2007



Figura 3.5. Bodega vinos Ventolera. Arquitecto: Francisco Izquierdo. San Juan de Huinca, Leyda, Chile. 2009.



Figura 3.6. Rubys Beach Resort. Arquitectos Broadway Malyan. Abu Dhabi 2010.



Figura 3.7. BIP Computers. Arquitecto: Alberto Mozó. Providencia, Santiago, Chile. 2007.

La utilización de madera laminada permite obtener elementos estructurales de dimensiones prácticamente imposibles de obtener, en la mayor parte de los casos, con madera natural de pino radiata. Así mismo, el proceso de clasificación de la madera y los modernos sistemas de fabricación permiten fabricar piezas libres de defectos que podrían afectar a su comportamiento.

Edificios de madera contralaminada

Los paneles de madera contralaminada tienen en común con la madera laminada el hecho de que la clasificación de la madera permite trabajar con madera libre de defectos .

Otra característica de la construcción con este tipo de paneles es que permiten conseguir reducir de forma muy importante los tiempos de ejecución de las obras realizadas con los mismos-



Figura 3.8. Casa Vita. Arquitecto: Iñaki Aspiazu. Ea, Vizcaya. 2010.



Figura 3.9. DigiPen Bilbao Institute of Technology. Arquitecto Ander de la Fuente. Zierbena, Vizcaya. 2011.



Figura 3.10. Ikaztegieta Udaletxea. Arquitectos: Astazaldi Arkitektura. Ikaztegieta, Guipúzcoa. 2011.

A continuación se presentan algunos edificios construidos con madera de pino radiata o en los que la misma ha tenido una presencia especial.



Figura 3.11. Casa SV. Arquitecto: BSZ Arquitectos – Andres Rainer Schulz Villanueva. Laguna de Aculeo/Paine, Chile. 2009.

Recubrimientos exteriores e interiores de con madera de pino radiata

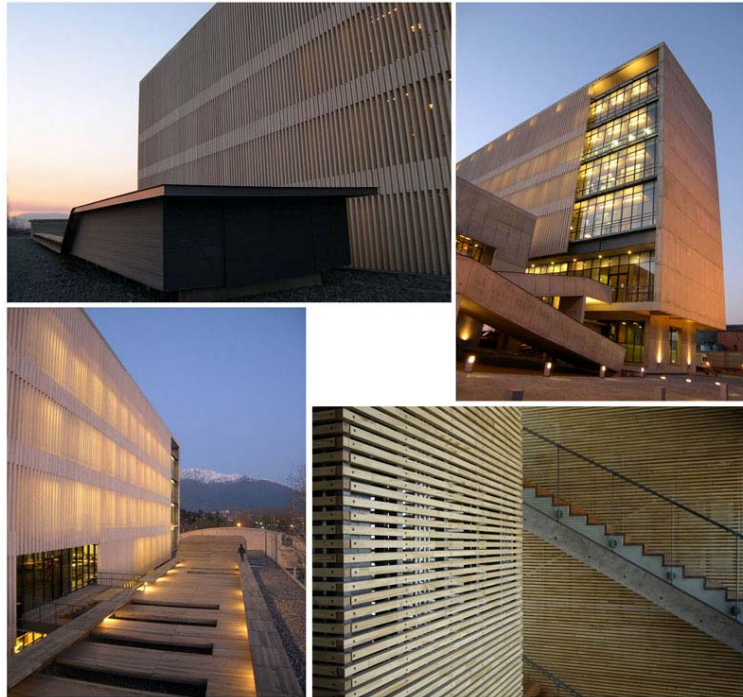


Figura 3.12. Edificio corporativo Vespuzio Sur. Alex Brahm, David Bonomi, Marcelo Leturia, Maite Martolomé. Autopista Vespucio Sur, Macul, Santiago, Chile. 2005.



Figura 3.13. Fachada de la E. U. de Magisterio. Arquitectos: Estudio K, Iñaki Arrieta. San Sebastian. 2011. Madera termotratada.

Puentes de madera laminada de pino radiata



Figura 3.14. Puente de madera laminada de 24m en Chile y puentes de 66 m de luz y puente de 86 m de longitud en Nueva Zelanda.

3.3 Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera aserrada

Para poder utilizar la madera para usos estructurales es preciso determinar sus propiedades físicas y mecánicas. Esta información es imprescindible para poder realizar cualquier estructura. La estimación de dichas propiedades se puede realizar de diversas maneras y con diferentes técnicas. A continuación se exponen dichas técnicas.

3.3.1. Clasificación visual

La clasificación visual de la madera es el método más antiguo de selección de la madera para cualquier tipo de uso incluido el estructural. La caracterización de la madera mediante métodos visuales, para uso estructural, es la evolución natural del procedimiento tradicional de clasificación.

Se basa en la inspección visual de la madera evaluando las particularidades inherentes a la misma; nudos, inclinación de las fibras, entrecasco, bolsas de resina, etc. que se pueden apreciar visualmente en la superficie de la misma. A estas particularidades algunos autores las denominan singularidades o defectos.

La presencia de dichas particularidades, su magnitud y la ubicación de las mismas y el número de veces que aparecen en la pieza permiten asignar la calidad visual y a partir de ella, la clase resistente.

A la hora de clasificar la madera se han de tener en cuenta, además de las particularidades antes citadas, otras más ligadas al proceso posterior al aserrado como fendas, acebolladuras, gemas, ataques bióticos (ataques de insectos y pudriciones) y por último se han de tener en cuenta las dimensiones de la pieza y su contenido de humedad.

Hasta el año 2007 se realizaron en España varios trabajos de clasificación de madera estructural (golfin 1998, Conde 2005, Hermoso 2001, 2003a, 2007b, Iñiguez 2005,).

La evaluación de todos estos parámetros se realiza de acuerdo con alguna de las numerosas normas nacionales existentes. En el caso de España, la norma UNE 56544, en la versión de 2007 (y posteriores) contempla 4 especies de coníferas y desde el mismo año permite clasificar la madera en dos grupos:

Madera de pequeña escuadría con una anchura de la pieza ≤ 70 mm y madera de gran escuadría > 70 mm.

Resultan interesantes Algunas publicaciones relacionadas con la clasificación visual de pequeña escuadría

Este tipo de normas está en permanente evolución tanto para incluir nuevas especies como para ajustar más los valores al ampliar el número de piezas ensayadas. Entre las normas europeas de clasificación podemos destacar la británica BS 4978:2007, la alemana DIN 4047-1:2003, la francesa NF B 52-001:2007+A1:2009, la nórdica NS-INSTA 142:2009 y la española UNE 56544:2011

Hasta la publicación de la UNE 56544:2007, esta norma solo contemplaba madera de pequeña escuadría (con una anchura ≤ 70 mm). Debido a ello, se daba el contrasentido de que la mayor parte de la madera estructural comercial comercializada en nuestro país quedaba fuera del ámbito de dicha norma.

A partir de la varias investigaciones con maderas de gran escuadría (Iñiguez 2007) se corrigió esta anomalía y desde entonces se puede clasificar, sin problemas, madera de pequeña y gran escuadría.

Entre las ventajas de la clasificación visual de la madera estructural está el que se trata de un método normalizado para la asignación de clases resistentes, lo que evita discrepancias en la valoración de los parámetros de resistencia de la madera.

Entre los inconvenientes de la misma se destaca el hecho de que la clasificación puede verse influenciada por la experiencia, la habilidad o incluso por la prisa del operario que la realiza, que puede aportar una importante dosis de subjetividad a los resultados obtenidos. Por lo que es esencial que el personal clasificador tenga la formación adecuada y que se realice periódicamente un control del material clasificado.

3.3.2. Clasificación automática

Dentro de la clasificación automática se pueden diferenciar tres grandes grupos de sistemas de clasificación. El primer grupo es el denominado de clasificación mecánica, que se basa en la relación existente entre la rigidez y la resistencia, realizando una prueba de carga no destructiva a cada una de las piezas a clasificar. El segundo grupo está formado por los sistemas basados principalmente en los métodos acústicos para la estimación de las propiedades mecánicas. Y finalmente, el tercer grupo recoge los métodos anteriores combinados, incluso con la clasificación visual.

A partir del año 1961 aparecieron las primeras máquinas de clasificación. El primer trabajo recogido por la bibliografía sobre este tema se debe a Hoyle que diseñó la que puede ser considerada como la primera máquina para la clasificación mecánica para madera estructural creada en los laboratorios de la Potlach Forest Inc, EEUU (Hoyle 1961).

Casi al mismo tiempo, en Gran Bretaña, Stanley y Curry publicaron los primeros trabajos sobre el mismo tema en Europa (Sunley y Curry 1962).

Actualmente la normativa europea contempla la clasificación mecánica de la madera mediante distintas máquinas tal y como queda recogido en la norma EN 14081:2008 *Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 4: Machine grading - Grading machine settings for machine controlled systems* (todavía no se ha traducido al español). Esta norma no incluye todas las máquinas de clasificación existentes en el mercado. La norma contempla y suministra los reglajes para su uso a las siguientes máquinas: Computermatic and Micromatic, Cook Bolinder (Tecmach), Dynagrade machine, E-scan machine, Euro-GreComat 702, Euro-GreComat 704, Euro-GreComat 706, GoldenEye 70s2, GoldenEye 704, GoldenEye 706, Grademaste, Precigrader, Raute Timgrader machine, Timber Grader MTG, Triomatic y Viscan.

Existen numerosos artículos y publicaciones que analizan y comparan las propiedades y rendimientos distintas máquinas de clasificación (Bengston 2006, Bacher, 2008, Hanhijärvi, 2008a, 2008b, Nocenti 2010, Ranta-Maunus 2010)

3.3.2.1. Clasificación Mecánica

Las máquinas de clasificación mecánica basan su funcionamiento en someter las piezas de madera a un ensayo de flexión relacionando las deformaciones producidas en la pieza con las propiedades mecánicas.

Las dos máquinas puramente mecánicas que se describen aquí, son la Computermatic y la Cook-Bolinder. Ambas ensayan la pieza sometiéndola a un esfuerzo de flexión, figura 3.3. Se trata de máquinas que calculan el módulo de elasticidad y a partir de este valor calculan los demás parámetros mecánicos. Las dos obtienen el módulo de elasticidad a partir de un ensayo de flexión, pero la técnica varía ligeramente de una a la otra, tabla 3.1.

Máquinas	Técnica principal
Computermatic/Micromatic	Flexión
Cook Bolinder / Tecmach	
Raute Timgrader	

Tabla 3.1. Algunas de las máquinas de ensayo a flexión

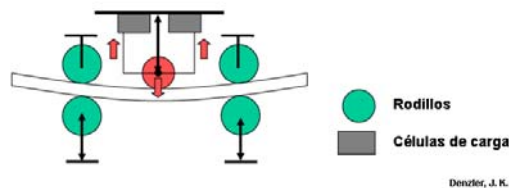


Figura 3.15. Esquema de funcionamiento de las pruebas de flexión

Computermatic: esta máquina mide la deformación producida al aplicar una fuerza constante sobre una tabla apoyada en dos rodillos (fuerza constante, deformación variable), figura 3.4.

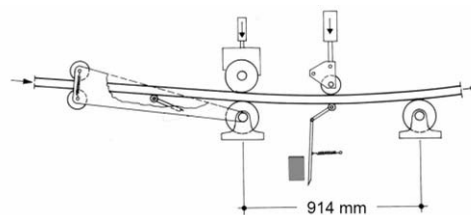


Figura 3.16. Esquema de la máquina *Computermatic*

Cook-Bolinder: su funcionamiento se basa en un principio parecido al anterior pero diferenciándose en que la máquina aplica la fuerza necesaria para obtener una deformación determinada (fuerza variable, flecha constante), figura 3.5,

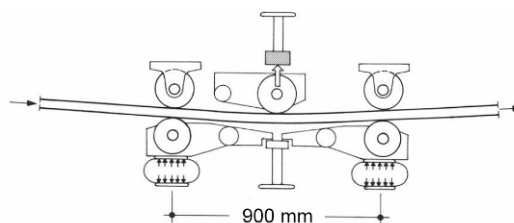


Figura 3.17. Esquema de la máquina *Cook-Bolinder*

Una limitación de ambas máquinas es que obtienen el módulo de elasticidad sobre la cara de la pieza y no sobre el canto, como sería de desear. Este proceder se debe a la mayor simplicidad para realizar el ensayo de flexión de cara, frente a realizarlo de canto.

Otro inconveniente de estos sistemas es la velocidad de paso de las tablas, pues a partir de una cierta velocidad las vibraciones afectan a los resultados del ensayo. La velocidad máxima de alimentación es de 105 m/min para la *Computermatic* y de 150 m/min para la *Cook-Bolinder* (reglajes de la EN 14081-4).

Pero el principal inconveniente de realizarlo de esta manera es que no se tiene en cuenta de forma adecuada el efecto de los nudos de canto en la resistencia por lo que algunos autores recomiendan complementarla con la clasificación visual de los nudos

Y por último, otra limitación es el grueso máximo de las piezas a ensayar que no puede superar los 76 mm por 300 mm de anchura en ambas máquinas, lo que impide su uso en piezas de gran escuadría >70 mm (Golfín et al. 2001, Hermoso 2003a).

3.3.2.2. Clasificación por métodos acústicos

3.3.2.2.1. Introducción

Los métodos acústicos son, después de la clasificación visual, los sistemas de clasificación, no destructivos, más antiguos que se conocen. Están basados en la propagación de una onda acústica por el material que se va a estudiar.

En la ciencia de los materiales se utilizan diferentes técnicas basadas en la propagación de las ondas acústicas. Dichas técnicas varían en función de la fuente que genera el impulso acústico, de las características de la respuesta analizada y de la forma de procesar la señal, etc. Esto dificulta el intentar abarcar todos los métodos existentes.

Se pueden utilizar los métodos acústicos para detectar defectos (como oquedades o fisuras) o bien para obtener algunas propiedades mecánicas del material debido a la buena relación entre las constantes dinámicas obtenidas a partir de la velocidad de propagación de las ondas acústicas y los valores mecánicos, como puede ser el módulo de elasticidad o de Young del material.

Estos métodos son descritos aquí con más detalle incluyendo sus principios debido a que son los utilizados en el desarrollo del trabajo.

3.3.2.2.2. Antecedentes

El biólogo italiano Lazzaro Spallanzani, en 1794, estudió la capacidad de los murciélagos de volar en la obscuridad total mediante la emisión de señales acústicas y la recepción de sus ecos o rebotes.

El Inglés Francis Galton, en 1876, consiguió emitir con un silbato sonidos de frecuencias muy elevadas, por encima de los límites de audición humana. Jaques y Pierre Curie publicaron en 1890 sus primeras observaciones sobre el fenómeno piezoeléctrico. Paul Langevin, en 1917, produjo el primer generador piezoeléctrico de ultrasonidos, usado durante la primera guerra mundial para detectar submarinos. Solokov propuso, en 1929, el uso de los ultrasonidos para detectar defectos, como fisuras y poros en los elementos metálicos.

En la década de 1940, Floyd Firestone en Estados Unidos, Donald Sproule en Inglaterra y en Alemania Adolf Trost, todos ellos trabajando por separado, desarrollaron y perfeccionaron la tecnología de ultrasonidos para la detección de defectos en diversos tipos de materiales, así como para la detección de submarinos y otros aspectos militares (Sziliard 1982).

Desde entonces los avances en los sistemas acústicos, ultrasonidos o sonidos, se han ido aplicando con éxito en la industria y en la construcción como herramientas básicas en el campo del control de calidad, especialmente en el campo de las estructuras metálicas (control de soldaduras), así como en el del hormigón y de la madera, en el campo de la clasificación mecánica de la madera aserrada y la diagnosis de estructuras existentes.

3.3.2.2.3. Ondas acústicas

Las ondas acústicas son las vibraciones mecánicas que se propagan a través de casi todos los materiales. Su velocidad depende fundamentalmente de la densidad del material y de las propiedades elásticas del medio en que se propagan.

La velocidad de propagación es:

$$V = \lambda \cdot f \quad (\text{ec. 3.1})$$

V: velocidad de propagación;

λ : longitud de onda;

f: frecuencia de vibración.

Las ondas sonoras se propagan en los materiales de diferentes maneras: longitudinalmente, transversalmente y superficialmente.

a) Ondas longitudinales

Ondas longitudinales, que también se llaman de compresión, habitualmente denominadas ondas P, se propagan de forma que las moléculas del material vibran de forma paralela a la dirección de propagación.

Dado que estas ondas provocan compresiones y expansiones en el material (producen variaciones de presión en las moléculas del material) se las conoce también como ondas de presión (stress waves).

Estas ondas longitudinales son las más habitualmente utilizadas en los ensayos no destructivos. Se generan y detectan fácilmente, y se propagan en todo tipo de medios (sólidos, líquidos y gaseosos).

Para un medio infinito, isótropo y elástico se aplica la siguiente expresión (Graff 1991):

$$V_P = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (\text{ec. 3.2})$$

Siendo:

V_P : velocidad de propagación;

E: módulo de elasticidad dinámico (longitudinal);

ν : coeficiente de Poisson;

ρ : densidad.

En el caso de medios finitos, en barras o en placas, la geometría influye en la velocidad de propagación de las ondas. Especialmente influye la relación entre las dimensiones transversales de la pieza y la longitud de onda que se desplaza. Así pues, cuando la dimensión transversal de la pieza es muy inferior a la longitud de onda propagada, como sucede con las probetas-vigas de este trabajo, se considera que la velocidad de propagación

de la onda prácticamente no depende del coeficiente de Poisson por lo que la expresión será (Graff 1991):

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{ec. 3.3})$$

Siendo:

V: velocidad de propagación de onda longitudinal;

E: módulo de elasticidad dinámico;

ρ : la densidad del material.

Se elegirá la ecuación del cálculo de la velocidad de propagación de la onda dependiendo en función de las dimensiones de la probeta y la longitud de onda.

Las ecuaciones anteriores son adecuadas para materiales isótropos, por lo que en el caso de la madera, que puede considerarse un medio homogéneo de simetría ortotrópica solo es una aproximación.

Una forma más precisa pero mucho más compleja para calcular la velocidad de propagación sería la obtenida utilizando las ecuaciones de Christoffel (Bucur et al. 2010)

b) Ondas transversales

Llamadas también de cortante u ondas S. Solo se propagan en medios con rigidez a cortante, es decir, en medios sólidos (o líquidos de muy alta viscosidad).

La velocidad de las ondas transversales se determina con la siguiente ecuación:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{ec. 3.4})$$

Donde

V_s : es la velocidad de propagación transversal;

G: es el módulo de elasticidad transversal;

ρ : la densidad del material.

Para una frecuencia determinada, la longitud de onda de las ondas transversales es menor que la de las ondas longitudinales por lo que las transversales son más sensibles a los defectos de pequeña dimensión pero también son más sensibles a la dispersión, teniendo, además, menor capacidad de penetración.

c) Ondas superficiales

Las ondas superficiales u ondas Rayleigh se propagan por la superficie del sólido generando en las partículas un movimiento longitudinal y transversal.

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12 \cdot \nu}{1 + \nu} \cdot V_S \quad (\text{ec. 3.5})$$

Siendo:

V_R : es la velocidad de propagación de la onda superficial (Rayleigh);

ν : coeficiente de Poisson

V_S : velocidad de propagación transversal de la onda.

Estas ondas aparecen cuando el generador incide sobre el sólido con un ángulo muy inclinado. Su velocidad de propagación es aproximadamente el 90% de la velocidad de propagación transversal.

Las velocidades de propagación de las ondas no son iguales, siendo las ondas P las más rápidas y las superficiales o Rayleigh las más lentas.

Propagación de las ondas:

La propagación de las ondas acústicas a través de los materiales está íntimamente relacionada con su microestructura. En el caso de la madera se han de tener en cuenta las células, principalmente longitudinales, las fibras y traqueidas, los radios medulares y los anillos de crecimiento, por lo que para entender bien la propagación de este tipo de ondas hay que entender la influencia del carácter anisótropo de la madera que provoca una elevada atenuación. Para poder trabajar en ella se opta por ondas de baja frecuencia por lo cual la madera pasa a poder considerarse como un material homogéneo con simetría ortotrópica.

Así mismo se ha de tener en cuenta la atenuación de la onda. La energía de la onda acústica se atenúa al atravesar el material ensayado por lo que cuanto mayor sea la atenuación del material, menor será el alcance de la onda.

La disminución de la energía acústica está relacionada con el material, su geometría, la frecuencia, el acoplamiento con el transductor, la geometría de los defectos en el material, etc. Las causas principales de esta atenuación estarán relacionadas con la disipación, la absorción, la colisión y la impedancia acústica (Bucur 1991, 1994).

Disipación de la energía acústica:

La onda se disipa conforme se aleja de la fuente puesto que la energía se ha de distribuir en un área mayor. La pérdida de intensidad por disipación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Absorción:

La absorción de la energía acústica se deba a las pérdidas producidas por fricción. Esta energía se transforma en calor.

Colisión:

La colisión de las ondas acústicas se produce con cualquier falta de homogeneidad del material, como poros, grietas, inclusiones.

Impedancia acústica:

La impedancia acústica Z se define como la resistencia que opone un medio a las ondas que se desplazan sobre él.

$$Z = \rho \cdot V \quad (\text{ec. 3.6})$$

Z : impedancia acústica;

ρ : densidad del material;

V : velocidad de propagación de la onda sonora.

Las pérdidas de energía acústica debidas a la impedancia se pueden producir por la presencia de una discontinuidad, por ejemplo la interfase material-aire, o por falta de homogeneidad en la estructura del material, o por las variaciones de densidad en la pieza ensayada.

3.3.2.2.4. Ultrasonidos

Los ultrasonidos son ondas mecánicas longitudinales con una frecuencia por encima de los 20 kHz. Se trata de una de las técnicas de inspección no destructiva más potentes y versátiles que existen ya que permite no sólo localizar y cuantificar el tamaño de los defectos internos para diferentes geometrías, sino también permite evaluar propiedades físicas, mecánicas o estructurales del material examinado. Existe una diversidad de técnicas (aparatos, forma de medición) que se pueden adaptar a cada aplicación en particular.

Las ondas ultrasónicas son generadas y detectadas generalmente por transductores piezoeléctricos que se acoplan a la pieza en inspección. De esta manera, un transductor piezoeléctrico convierte la señal eléctrica que recibe en una señal mecánica de alta frecuencia (onda de ultrasonidos) que se manda al material inspeccionado y, posteriormente, el transductor receptor convierte la respuesta que recibe en una señal eléctrica. La interpretación de la señal recibida de dicha onda sonora permite obtener información sobre discontinuidades en el material.

Típicamente, las frecuencias de inspección por ultrasonido son de 20 kHz a 25 MHz, que no son audibles para el ser humano (limitado a frecuencias entre 20 y 20.000 Hz).

A mayor frecuencia mayor absorción y menor alcance, por lo que en general la frecuencia será lo más alta posible para permitir la detección de defectos pequeños pero teniendo que cuanto mayor sea la frecuencia menor será el alcance.

En función del material, las frecuencias más utilizadas son:

Para materiales metálicos frecuencias medias: de 1 a 5 MHz, aunque en algunos casos pueden ser superiores (15 MHz), para materiales cerámicos o plásticos: bajas y medias frecuencias, de 0,25 a 4 MHz, para hormigón baja frecuencia: de 50 a 200 kHz y para madera baja frecuencia: de 20 a 500 kHz. En madera los mejores resultados se obtienen con frecuencias de 40 a 50 kHz.

Métodos de medición ultrasónicos:

a) Método de pulso-eco

En este método se utiliza un único palpador que sirve de emisor y receptor. Éste envía la señal (un primer pulso o eco), y la recibe de nuevo, como reflejo de la pared opuesta del objeto, figura 3.6. Si detecta algún defecto, parte de la onda se refracta y parte se refleja debido a la diferencia de impedancias acústicas en la interfase pieza-defecto, generando otro pulso-eco en la señal recibida en el osciloscopio.

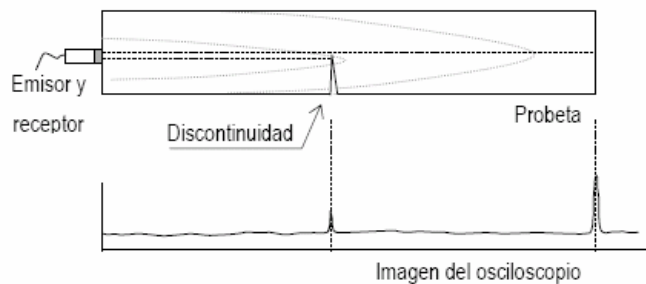


Figura 3.18. Ultrasonidos por el método de pulso-eco (Esteban, 2003).

Conociendo la velocidad de transmisión de la onda y el instante en el que se produjo el pulso o señal en el osciloscopio, es posible localizar la posición del defecto:

$$S = V \cdot t \quad (\text{ec. 3.7})$$

S: distancia;

V: velocidad;

T: tiempo.

Es un método muy utilizado en materiales como el acero o el hormigón pero no en madera, donde resulta poco efectivo.

b) Método de transmisión

En este método se aplica una onda de ultrasonido en un punto de la pieza, y en otro opuesto se recibe la señal, figura 3.7. Es el método más adecuado para materiales dispersivos, como la madera, que atenúan la señal.

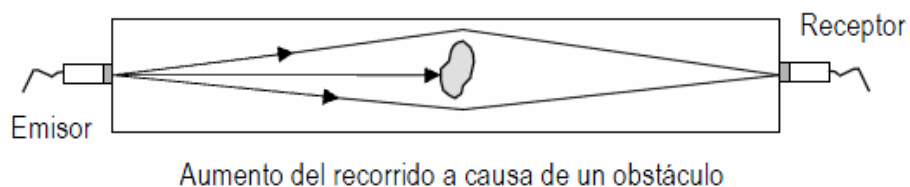


Figura 3.19. Ultrasonidos por el método de transmisión de ultrasonidos (Esteban 2003).

Si se colocan los palpadores emisor y receptor de manera enfrentada la onda recorrerá el material por el camino más corto, y tendrá que sortear las discontinuidades que encuentre a lo largo del recorrido, aumentando en ese caso el tiempo de propagación de dicha onda.

Los transductores pueden situarse en distintas posiciones en testas opuestas, en caras opuestas u en la misma cara. La colocación de los transductores puede hacerse tal y como se explica en el apartado 5.8, figuras 5.7, 5.8 5.9

Obtenido en tiempo de propagación de la onda, es posible obtener la velocidad de propagación conociendo la distancia S entre los palpadores:

$$V = \frac{S}{t} \quad (\text{ec. 3.8})$$

donde,

t : tiempo de propagación;

S : distancia entre palpadores;

V : velocidad de propagación de la onda.

Con este método es posible estimar las propiedades mecánicas de la madera, basándose en la relación entre la velocidad de propagación de la onda ultrasónica V , la densidad ρ y el módulo de elasticidad dinámico E_{din} , dada por la ecuación de Christoffel que simplificada queda:

$$E_{din} = \rho \cdot V^2 \quad (\text{ec. 3.9})$$

Nota: en la ecuación 3.8 se considera que se trata de piezas con una longitud muy superior a la longitud de la onda, por lo que puede despreciarse el efecto del coeficiente de Poisson.

Con el método de transmisión no es posible la localización de defectos, ya que no hay reflejo proveniente de él como en el método de pulso-eco.

Sandoz (1989) demostró que para el equipo de ultrasonidos Sylvatest Duo, cuya frecuencia es de 22 kHz, existía una relación lineal entre la velocidad y el contenido de humedad, cuando ésta se sitúa entre el 5% y el 30%. Según esta relación, la velocidad disminuye un 0,8% por cada aumento del 1% sobre la humedad de referencia del 12%.

En el campo de la madera estructural se han realizado numerosos estudios que han demostrado la fiabilidad de los ultrasonidos, así como se han desarrollado métodos para la aplicación de esta técnica (Pellerin 1965, Sandoz 1989). Así mismo se han llevado a cabo un gran número de trabajos que utilizan la velocidad ultrasónica como variable clasificadora de la calidad de la madera u otras propiedades (Beall 2002). Así por ejemplo

se han obtenido en general elevadas correlaciones entre la velocidad de propagación de ultrasonidos en dirección longitudinal y módulo de elasticidad, con el pino pinaster (Acuña et al. 2007a), con pino radiata (Arriaga et al. 2005a, Carballo 2007) pino amarillo del sur (Rajeshwar 1997), velocidad y densidad (Oliveira 2006).

También han sido ampliamente utilizados en el estudio de árboles en pie, trozas y rollizos: detección de defectos en el interior de la madera (Kavir 2000, Karsulovic 2000, Mendez 2003), clasificación de los rollizos antes del aserrado (Dickson 2004), madera en pie frente a aserrada (O'Neil 2005), madera en rollo de pino laricio (Hermoso et al. 2003, 2007c).

Igualmente ha demostrado su utilidad para el estudio del estado de las estructuras y estudio de edificios históricos (Rodríguez-Liñan 1998, 2000, Ross y Hunt 2000, Emerson 2006, Brashaw 2005, Ross 2006, Ramón-Cueto 2007)

3.3.2.2.5. Ondas sónicas

Los métodos sónicos se basan en la generación de ondas mecánicas de baja frecuencia (inferiores a 20 kHz) generalmente producidas mediante impacto. La señal es captada por un receptor que permite obtener el tiempo transcurrido entre ambos momentos. Con el tiempo y la longitud de la pieza se puede calcular la velocidad a la que onda que se propaga por el medio:

$$V = \frac{S}{t} \quad (\text{ec. 3.10})$$

donde,

t: tiempo de propagación;

S: distancia recorrida por la onda sónica;

V: velocidad de propagación de la onda.

A partir de la velocidad obtenida y de la densidad se obtiene el módulo de elasticidad dinámico

$$E_{\text{din}} = \rho \cdot V^2 \quad (\text{ec. 3.11})$$

donde,

E_{din} : módulo de elasticidad dinámico;

ρ : densidad

V: velocidad de propagación de la onda.

Utiliza dos transductores, uno emisor, que es el que se golpea con el martillo para producir la onda, y otro receptor, que recoge la señal y la envía al aparato de medición o a un osciloscopio acoplado al equipo, figura 3.8.

La colocación de los transductores puede hacerse tal y como se explica en el apartado 5.8, figuras 5.7, 5.8 y 5.9

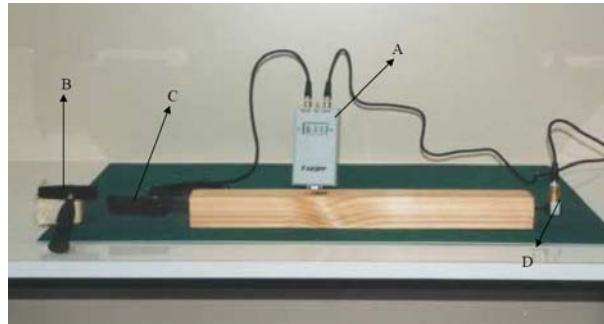


Figura 3.20. Aplicación de ondas sónicas por el método de transmisión, medición directa

Como ya se ha mencionado, son ondas mecánicas de baja frecuencia (inferior a 20 kHz) por lo tanto tienen una elevada longitud de onda ($V = \lambda \cdot f$). Así por ejemplo, en este proyecto se ha utilizado el equipo de Fakopp, Microsecond Timer. Teniendo en cuenta que la velocidad media obtenida está alrededor de 5200 m/s, la longitud de onda λ de las ondas emitidas es de 2,6 m, muy superior a la de ultrasonidos que se sitúa en torno a los 30 cm.

Tratándose de ondas mecánicas, de igual naturaleza que los ultrasonidos, todo lo explicado en ese apartado en lo referente a las características de las frecuencias y factores que afectan a su propagación, es aplicable a éstas, siempre teniendo en cuenta que se trata de ondas con mayores longitudes de onda que las ultrasónicas. Además, no se ven afectadas por la falta de homogeneidad del material, ya que la longitud de onda es muy superior al tamaño medio de los gránulos o células que forman el material y por tanto, son aptas para materiales heterogéneos como la madera o el hormigón.

Al igual que en los ultrasonidos el contenido de humedad influye en la velocidad y por tanto se debe realizar una corrección.

Las técnicas que utilizan las ondas sónicas tienen las mismas ventajas que las que utilizan ultrasonido: son fiables, los equipos son portátiles, fáciles de utilizar y su coste no es elevado, además de la rapidez de aplicación. Como desventaja cabe citar que su poder de resolución es menor que en los ultrasonidos (no puede detectar defectos tan pequeños como los ultrasonidos).

Entre sus aplicaciones destaca la detección de pudriciones o degradación en árboles en pie, madera en rollo o aserrada (Wang 2000, Santaclara 2009) y la estimación de las propiedades resistentes de la madera puesta en obra (Ross y Hunt 2000, Brashaw et al. 2005, 2008, Esteban et al. 2006, Wang 2008, Iñiguez 2009, Divos 2010, 2011b).

En el primer caso se utiliza la velocidad de la onda sónica en una sección transversal de la pieza y en el segundo la estimación se realiza con la velocidad longitudinal generalmente relacionada con la densidad.

3.3.2.2.6. Análisis de vibraciones

En todo sistema elástico la frecuencia natural de vibración representa una importante propiedad dinámica. Cuando una pieza, con unas dimensiones determinadas vibra, su frecuencia natural de vibración está relacionada con algunas de sus propiedades físicas y mecánicas (densidad y módulo de elasticidad) por lo que se puede determinar el módulo de elasticidad dinámico conociendo la frecuencia natural de vibración de la pieza prismática de dimensiones determinadas y su densidad.

La relación entre la frecuencia de vibración y el módulo de elasticidad se conoce desde principios del siglo XIX (Jayne 1959) y se enuncia suponiendo que se trata de medios sólidos: homogéneos, isotropos y perfectamente elásticos. Pero puede aplicarse también a sistemas heterogéneos, como la madera o el hormigón, siempre y cuando las dimensiones de la pieza son grandes en relación al tamaño de los elementos que constituyen el material (Malhotra et al. 2003).

En resumen, la utilización del método de análisis de vibraciones consiste en medir la frecuencia natural de vibración de una pieza y a partir de ella, estimar sus propiedades resistentes. Ha sido una técnica muy estudiada tanto en madera aserrada como en productos transformados (Divos 2002, Wang 2004, Arriaga 2005b, 2008, Hanhijarvi et al. 2005, O'Neill 2005, Íñiguez et al. 2007b, Casado 2007).

Dependiendo de las condiciones de apoyo y del lugar del impacto que provoca la vibración, se pueden dar las siguientes tipos:

- a) Vibración longitudinal
- b) Vibración transversal (o en flexión)
- c) Vibración en torsión

a) Vibración longitudinal

Cuando se golpea la testa, figura 3.9, la vibración generada permite determinar la frecuencia natural de vibración en la dirección longitudinal.

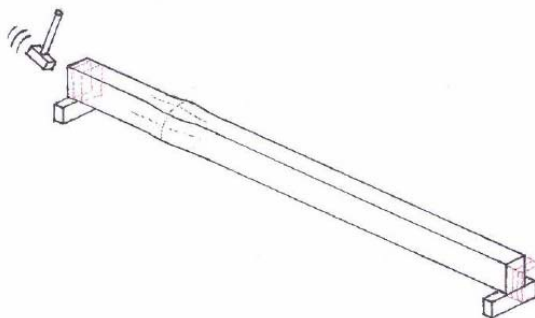


Figura 3.21. Vibración longitudinal (Íñiguez 2007).

Resolviendo la ecuación diferencial de propagación de las ondas planas longitudinales a través de una barra de sección constante (Weaver 1990), se obtiene la expresión que permite calcular el módulo de elasticidad dinámico del material a partir de la frecuencia natural de vibración longitudinal de una probeta:

$$E_{\text{din}} = (2L \cdot f)^2 \cdot \rho = V^2 \cdot \rho \quad (\text{ec. 3.112})$$

donde:

E_{din} : es el módulo de elasticidad dinámico;

L : es la longitud de la probeta;

f : es la frecuencia natural de vibración longitudinal;

ρ : es la densidad del material.

b) Vibración transversal o en flexión

Si se golpea transversalmente a la directriz de la pieza, en sentido perpendicular a su eje longitudinal, la pieza comenzará a vibrar en flexión.

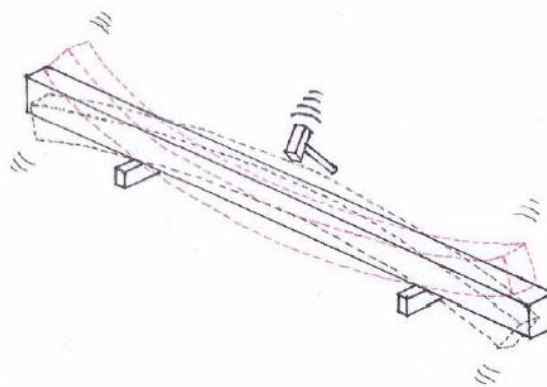


Figura 3.22. Vibración transversal (Íñiguez 2007).

El modelo utilizado en este caso es la teoría de Bernoulli-Euler para barras sometidas a flexión. Esta teoría supone que una sección transversal plana permanece plana durante las deformaciones debidas a la flexión. La ecuación para vibración libre es:

$$E \cdot I \frac{\delta^4 y}{\delta x^4} + \rho \cdot A \frac{\delta^2 y}{\delta t^2} = p(x, t) = 0 \quad (\text{ec. 3.13})$$

donde,

E: módulo de elasticidad de la pieza;

I: momento de inercia de la sección;

y: desplazamiento de las partículas en vibración;

x: coordenada longitudinal;

ρ : densidad de la pieza;

t: tiempo.

Hay que tener en cuenta que se trata de una ecuación aproximada. Sólo considera las deformaciones por flexión, mientras que las debidas a esfuerzos cortantes y a las fuerzas inerciales, causadas por la rotación de la sección transversal, se desprecian. Para la madera, esta simplificación es aceptable para esbelteces (longitud/grosor) superiores a 15. Por debajo de este valor, habría que utilizar la ecuación de Timoshenko, mucho más compleja al tener en cuenta la contribución del cortante y las fuerzas inerciales.

La solución a la ecuación de Bernoulli-Euler resulta:

$$E_{vib,flex} = \left(\frac{2 \cdot \nu_n}{\gamma_n} \right)^2 \cdot \frac{m \cdot L^3}{I} \quad (\text{ec. 3.14})$$

siendo,

$E_{vib,flex}$: módulo de elasticidad dinámico obtenido con vibración en flexión;

ν_n : frecuencia de vibración en el modo n de vibración;

γ_n : constante de valor $n = \gamma_n = (n + 0,5)^2$;

m: masa de la pieza;

L: longitud de la pieza;

I: momento de inercia de la sección.

El modelo utilizado en este caso es para barras sometidas a flexión. Para la madera con esbelteces (longitud/grosor) superiores a 15 esta simplificación es aceptable (Hearmon 1966, Murphy 1997, Brancheriau 2002).

En este trabajo se ha utilizado un equipo con un software que aplica la transformada de Fourier, (en nuestro caso el P.L.G.) se obtiene la frecuencia principal de vibración.

Los estudios realizados han demostrado que la técnica de vibración, al igual que otras TND, es capaz de clasificar la madera mejor que la clasificación visual, ya que puede detectar diferencias

entre piezas que son inapreciables al ojo humano (Ross 1991, Hanhijarvi 2005, O'Neill 2005, Íñiguez et al. 2007b, Piazza et al. 2008, Sales 2008).

Además de la fiabilidad, otra de las ventajas que presenta esta técnica es la rapidez y facilidad de aplicación, la portabilidad y el precio de los equipos. Y su principal inconveniente, que no se puede utilizar con madera en servicio al no poderla hacer vibrar libremente.

3.3.2.3. Clasificación mediante técnicas mixtas

El tercer grupo contempla máquinas que incorporan técnicas de los dos grupos anteriores (mecánicos y acústicos) y además suelen incluir otras mediciones para estimar otras propiedades, como la densidad o la nudosidad (Sandoz 2007, Hanhijarvi 2008a, 2008b). Algunos de los nuevos parámetros que estudian son los siguientes:

Densidad: mediante balanzas, rayos X;

Nudos y otras particularidades: mediante cámaras, escáneres laser, rayos X.

En la tabla 3.2 se recogen los equipos más frecuentes en la industria. En este apartado se describen alguno de estos equipos ordenados por la técnica principal que emplean.

Máquinas	Técnica principal
Dynagrade VISCAN Timber grader MTG PLG Fakopp	Vibración
Euro-GreComat 702 GoldenEye 702	Rayos X
Euro-GreComat 704	Rayos X + Flexión
Euro-GreComat 706 GoldenEye 706	Rayos X + Vibración

Tabla 3.2. Máquinas y tipos de ensayos que realizan

a) Basadas en el análisis de vibración

Portable Lumber Grader (Fakopp):

El Portable Lumber Grader (PLG) de la empresa Fakopp es un equipo usado para la clasificación de la madera estructural que basa su funcionamiento en el análisis de las vibraciones inducidas al golpear la pieza con un martillo. Las vibraciones son registradas por un micrófono y analizadas con la ayuda de un ordenador. Además tiene en cuenta la masa de la pieza que obtiene mediante una báscula incluida en el equipo, el

contenido de humedad y parámetros de calidad visuales. La máquina asigna la clase resistente a partir del módulo de elasticidad dinámico.

Microtec Viscan:

Se trata de un proceso automático. La máquina golpea la tabla con una bola de acero y un interferómetro laser analiza, sin contacto con la pieza, la frecuencia natural de vibración de la misma y a partir de este dato el programa de la máquina obtiene el módulo de elasticidad dinámico asignando a partir de él las restantes propiedades mecánicas, figura 3.11.

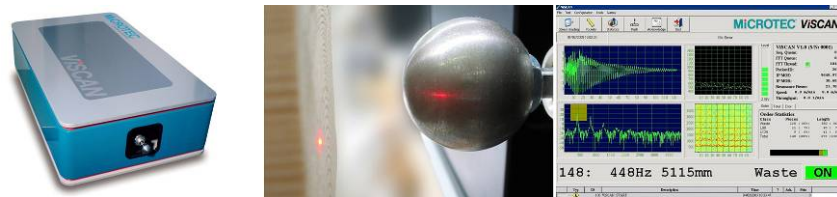


Figura 3.23. Vista de la máquina, mecanismo de impacto y pantalla de datos del Viscan.

Las piezas se desplazan transversalmente a la dirección de la cinta de transporte y puede ensayar 150 piezas por minuto. El grueso máximo procesable es de 110 mm (sección máxima 110 x 319 mm)

b) *Basadas en la utilización de Rayos X*

Microtec GoldenEye 702

Utiliza el escáner de Rayos X y Cámaras mediante los cuales valora nudos, densidad, gemas fendas, etc.), figura 3.12. La velocidad máxima es de 450 m/min y el grueso máximo 110 mm.

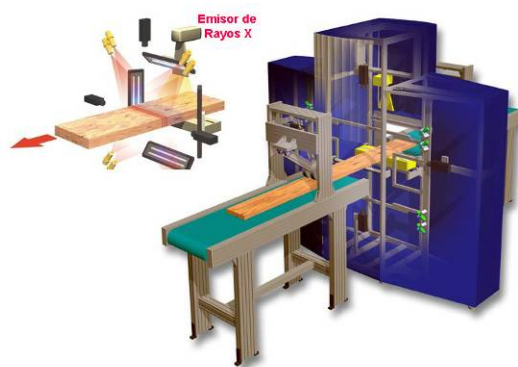


Figura 3.24. Microtec 702 y esquema del sistema de Rayos X.

c) *Basadas en la combinación de Rayos X + Flexión*

Euro-GreComat 704

3.4. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas y del estado de la madera en estructuras existentes

3.4.1. Introducción

Las técnicas y ensayos que se explican a continuación se usan principalmente para determinar las propiedades mecánicas así como el estado de las maderas en estructuras existentes, pero algunas de ellas también se pueden usar en la caracterización de madera nueva.

La determinación de las propiedades mecánicas y del estado de la madera puesta en obra presenta algunas diferencias y limitaciones con respecto a todo lo explicado en los apartados anteriores referente a la madera nueva.

En la madera nueva se pueden observar todas sus caras, se pueden medir sus dimensiones, se puede pesar y se puede medir el contenido de humedad. Se puede clasificar visualmente sin ninguna limitación o se puede clasificar mediante cualquiera de las técnicas explicadas en los apartados anteriores.

Nada de esto se puede realizar al 100 % en la madera puesta en obra. La primera dificultad será determinar las dimensiones reales de la pieza al no poder, en la mayoría de los casos, determinar el canto de la misma por estar oculto entre 1/2 y 2/3 de su altura. Igualmente queda oculta la parte empotrada en los muros.

Otra dificultad radica en la determinación de la densidad de la madera al no poder obtener directamente la masa de la misma.

No menos importante, al tratarse de madera que lleva tiempo en obra, será conocer en qué estado se encuentra, si ha sufrido algún tipo de alteración o ataque biótico que merme sus propiedades mecánicas. En muchos casos estas degradaciones no son apreciables a simple vista.

Por todo ello, a la hora de valorar las propiedades físicas y mecánicas, así como el estado de la madera puesta en obra, se habrán de realizar algunas pruebas que permitan conocer sus propiedades y el estado en que se encuentra, siendo conscientes de que la fiabilidad de las observaciones y el resultado de los ensayos realizados, será inferior a los que se obtendrían en madera nueva.

Existen numerosos trabajos sobre la diagnosis en estructuras existentes (Ceccotti 1991, Esteban 2002, Lear 2005, Minster 2006, Palaia et al 2008, Kasal 2011a, Kasal et al. 2011b,)

3.4.2. Clasificación visual en estructuras existentes

A la hora de aplicar los criterios de la clasificación visual a la madera puesta en obra, aparece un primer problema, en la mayor parte de los casos no se dispone de la identificación de la especie de madera con el problema añadido de que aunque se encargue la identificación a un laboratorio especializado, los resultados de la misma se conocerán con posterioridad a la finalización de los trabajos “in situ”.

Otra limitación es la imposibilidad de observar todas las caras de la pieza estudiada. Esto hará que la clasificación visual se limite a las partes vistas de la pieza, generalmente la cara inferior y

una parte de las caras laterales, realizándose de la misma manera que si se tratase de madera nueva pero siendo conscientes de las limitaciones.

Se tendrá en cuenta todas las particularidades que afectan a la resistencia de la madera, pero en este caso se prestará especial atención a los efectos producidos por los ataques bióticos o abióticos producidos a lo largo de la “vida” de la estructura y que en el caso de madera nueva serían inadmisibles.

A pesar de todas las limitaciones de la clasificación visual es opinión general el que por si sola, o mejor combinada con ensayos no destructivos, presenta unos resultados correctos a cambio de que quien realice el trabajo tenga experiencia en la misma.

La utilización de las normas actuales de clasificación visual de la madera no ofrecen buenos resultados cuando se aplican a estructuras existentes. Esto es debido, no sólo al hecho de que la inspección visual no suele ser posible en todas las superficies, sino también a otras razones; generalmente las normas recientes están pensadas para escuadrías pequeñas, y sobre todo se plantean como una selección previa de la madera en el aserradero. Sin embargo, en la antigüedad las piezas de madera apenas podían seguir unos criterios similares a los actuales. Es seguro que habría una selección, pero no simplemente con un criterio estructural. Por tanto, la madera de estructuras existentes normalmente presenta una gran dispersión en los resultados de propiedades mecánicas.

Existe un reciente precedente de normativa orientada a la clasificación visual de piezas de madera de estructuras existentes. Es el caso concreto de las normas italianas siguientes:

- UNI 11119:2004. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici – Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera.
- UNI 11138 :2004. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l’esecuzione di interventi.
- UNI 11203 :2007. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Terminologia delle configurazioni strutturali e delle parti costituenti.

La norma UNI 11119:2004 propone unas reglas de clasificación y unos valores de propiedades mecánicas para varias especies habituales en Italia. De un análisis de esta norma no parece fácil o práctica para su aplicación en el caso de España. En cierta manera, mantiene el esquema de las normas actuales de perseguir el objetivo principal de clasificar la madera y no la de evaluar su capacidad resistente. Esto suele llevar a resultados de elevados porcentajes de rechazos en estructuras existentes. No obstante, es un ejemplo de norma de alto interés en este campo.

En España existe el Informe AENOR sobre diagnóstico de edificios, UNE 41805 IN Diagnóstico de edificios, compuesta por 14 partes. La parte 8, UNE 41805-8 IN Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructura de madera, tiene el por objetivo “establecer las pautas para el diagnóstico de los diferentes elementos que constituyen la estructura resistente ya sea de entramado mixto de madera y fábrica, en estructura exenta e independiente del propio muro o los elementos del forjado, y siempre que estas estructuras sean de madera o estén integradas en parte por dicho material”. Se trata de un primer

paso al que parece que seguirá, en un futuro no muy lejano, la aparición de alguna norma relacionada con las técnicas de diagnóstico.

3.4.3. Estimación de las propiedades elásticas

Para la estimación de las propiedades elásticas de la madera en estructuras existentes las técnicas más prácticas son aquellas que permiten determinar la velocidad de transmisión de ondas en el material. A partir de la velocidad (normalmente junto con la densidad) se puede estimar la rigidez y en menor grado la resistencia.

Para ello se utilizan equipos portátiles de ultrasonidos o de ondas de impacto como los empleados en este trabajo descritos en el capítulo de metodología. Estos equipos pueden utilizarse aplicados directamente sobre la pieza puesta en obra, sin necesidad de desmontar la estructura. Sobre el uso de los ultrasonidos en diagnóstico se puede consultar los siguientes trabajos: (Rodríguez-Liñan 1998, 2000, Brashaw 2005, Ross 2006, Ramón-Cueto 2007). Con relación a las ondas sónicas o de impacto (Ross y Hunt 2000, Brashaw et al. 2005, 2008, Esteban et al. 2006, Wang 2008, Divos 2011a).

Otra técnica que ofrece resultados de predicción equivalente o incluso algo mejores, es la del análisis dinámico de vibraciones. Esta técnica es sencilla de aplicar y mediante la vibración longitudinal o de flexión se puede estimar el módulo de elasticidad y también, con menor exactitud, la resistencia. La desventaja con respecto a los sistemas antes descritos es que es necesario desmontar las piezas de la estructura, ya que el método exige que la pieza pueda vibrar libremente.

Además, dentro de las técnicas de análisis dinámico de vibración existe un método que consiste en hacer vibrar la estructura, sin desmontar, en dos situaciones de carga diferentes. Conociendo las frecuencias de vibración en ambos casos y la diferencia de carga aplicada, se puede deducir la rigidez del sistema. Este método se ha aplicado principalmente en puentes y muy poco en edificación (Crews et al. 2004a, 2004b, Choi et al. 2007, Samali et al. 2007, Baño et al. 2011).

3.4.4. Determinación de la densidad

Cuando se clasifica madera nueva la determinación de la densidad no presenta problemas técnicos; se pueden medir, se puede pesar y se puede conocer su contenido de humedad. Con todos estos datos se puede obtener la densidad.

En aquellos casos en los que no resulte posible medir alguna de las dimensiones de la pieza la obtención directa de la densidad no será posible. Esto sucede habitualmente cuando la madera se encuentra en servicio. En estos casos es necesario utilizar técnicas que permitan obtener, de forma indirecta, la densidad de la madera.

Dos de las técnicas más utilizadas actualmente para obtener de forma indirecta la densidad son el uso de penetrómetros y de aparatos de arrancamiento de tornillo, con los que se están obteniendo resultados cada vez más satisfactorios.

También se está trabajando con otras herramientas como el resistógrafo y de forma incipiente con esclerómetros, aunque todavía la calidad de sus predicciones no está a la altura de los otros equipos anteriores.

a) Penetrómetro Pilodyn

El aparato más utilizado actualmente el penetrómetro Pilodyn (de la empresa Proceq) que mide la profundidad de penetración de una varilla de acero que es impulsada por un resorte, con una energía conocida. Por tanto el valor obtenido es, estrictamente, el valor de resistencia a la penetración que está íntimamente ligado entre otras características del material con la dureza superficial (véase apartado 5.5).

Inicialmente el aparato se utiliza para detectar zonas con una dureza anormal, inferior a la media, en la zona superficial de la madera, generalmente producida por ataques de hongos de pudrición, habiéndose usado especialmente en la evaluación del estado de los postes de madera usados en tendidos eléctricos (Wilson 1981).

Así mismo ha sido utilizado para obtener información en árboles en pie, tanto para determinar la presencia de ataques bióticos como para predecir sus propiedades mecánicas o para seleccionar los árboles que se van a cortar en las claras (Cown 1978, 1982, Micko 1982, Smith 1986, Notivol 1992, Lopez 1995, Greaves 1996, Raymond 1998, Wu 2010)

Y por último, también se ha utilizado en la realización de inspecciones en los elementos estructurales de edificios existentes con la finalidad principal de determinar la densidad (Watt 1996, Bobadilla et al. 2007, 2009, Iñiguez et al. 2006, 2008)

Entre las ventajas de esta máquina están la ligereza, la portabilidad, la facilidad de manejo y la obtención de un valor numérico. Entre los inconvenientes, el que a pesar de que la máxima penetración de la sonda es de 40 mm, los valores de penetración suelen agruparse en recorridos bastante pequeños por lo que diferencia poco ya sea la profundidad de afectación de la degradación por causas bióticas o en su caso a la hora de determinar valores de densidad.

Otro inconveniente es que el valor obtenido resulta a veces poco representativo, excesivamente local del punto analizado por lo que es recomendable realizar varias lecturas en puntos próximos para tomar el valor medio.

b) Extracción o arrancamiento de tornillo

El ensayo consiste en arrancar un tornillo que se ha introducido previamente a una determinada profundidad, midiendo la fuerza ejercida para arrancarlo (véase apartado 5.6).

Esta técnica comenzó a emplearse en la inspección de estructuras de madera en edificios (Divos et al. 2004, 1997, Basterra 2008) o para determinar la densidad en madera nueva (Bobadilla 2007, Casado 2009b). Los valores obtenidos permiten llegar a estimar valores de densidad de la madera estudiada con cierta precisión.

Se trata de una técnica que obtiene valores “puntuales” por lo que es conveniente realizar varios ensayos para obtener el valor medio. Así mismo requiere cierta preparación para accionar la máquina a la misma velocidad.

La máquina es fácilmente transportable aunque su uso en vigas no resulta demasiado sencillo, requiriendo habilidad y fuerza para realizar la prueba una sola persona.

La fuerza realizada para realizar la extracción se relaciona con la densidad de la madera, estando influida por el diámetro del tornillo, y la profundidad a la que se ha introducido.

c) Extracción de probetas testigo

Se trata de un ensayo moderadamente destructivo. Mediante la extracción de probetas testigo se pueden obtener distintas informaciones a partir de las mismas.

Barrena Pressler

La Barrena Pressler es la herramienta más utilizada para la extracción de muestras inalteradas de madera en el árbol en pie. Las muestras extraídas permiten determinar la edad del árbol, figura 3.27. También permiten detectar alteraciones en el interior del tronco. Se trata de una herramienta sencilla pero que requiere una cierta experiencia para un correcto aprovechamiento de las muestras (Maeglin 1979).



Figura 3.27. Barrena Pressler

Fractómetro

A partir de una probeta inalterada de 5 mm de diámetro, extraída, en la dirección radial del tronco, con la barrena Pressler o alguna herramienta similar, el aparato realiza un ensayo de rotura por flexión en dirección radial o también, según la versión del aparato, por compresión paralela a la fibra (Bethge et al. 1996, Maeglin 1979). Se ha utilizado para conocer la capacidad portante de troncos de árboles en pie, pero no se han realizado investigaciones concluyentes que lo hagan apropiado para su utilización en la valoración de propiedades resistentes en estructuras de madera, figura 3.16.



Figura 3.28. Fractometer (Catálogo de IML)

Testigos a compresión paralela a la fibra (Core-Drilling)

Otra técnica relacionada, el *Core-Drilling*, consiste en la extracción mediante un taladro especial de probetas de 4,8 mm de diámetro que son sometidas a un ensayo de compresión en la dirección de las fibras, figura 3.17 (Kasal 2004).

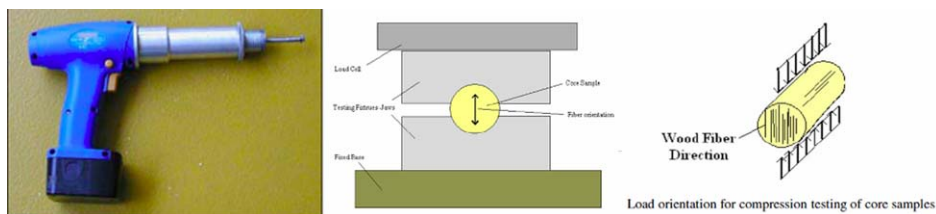


Figura 3.29. Taladro y ensayo de compresión de probetas de Core-Drilling. (Kasal, B).

Probetas testigo

En esta tesis se ha trabajado con probetas de madera realizadas tal y como se explica en el apartado 5.7. Mediante una corona de 22 mm de diámetro exterior se obtienen unas probetas de 16 a 17 mm de diámetro, con longitudes de hasta 20 mm extrayendo en cada pieza una en dirección perpendicular a la cara y otra al canto, figura 3.18. Estas probetas se han utilizado para determinar la densidad de las piezas ensayadas en este trabajo.



Figura 3.30. Probetas testigo, extracción, pesado y probetas

d) Sondeo con taladro (Resistógrafo)

El uso de un taladro para detectar anomalías en el interior de la madera es una de las técnicas más antiguas utilizadas en la diagnosis de estructuras de madera.

La resistencia a la penetración de la broca que presenta la madera indica al técnico la homogeneidad de la pieza analizada. Las variaciones en el esfuerzo a realizar pueden permitir detectar zonas blandas producidas por pudriciones, oquedades, galerías de insectos, fendas u otras alteraciones.

A pesar de ser una técnica sencilla requiere una cierta experiencia por parte del operario que la realiza, pudiéndose dar el caso de diferentes interpretaciones de un mismo problema al analizarlo dos operarios diferentes.

Basándose en la técnica del taladro pero intentando eliminar la subjetividad en la interpretación del ensayo se diseñó la herramienta denominada Resistógrafo.

El resistógrafo es un taladro con una broca muy larga, hasta 400 mm y muy delgada (1,5 mm el fuste y 3 mm en la punta). Al perforar, la punta avanza a velocidad constante aplicando mayor o menor potencia para mantener dicha velocidad.

El equipo registra y almacena en su memoria la energía consumida en cada momento. Así mismo imprime un gráfico en el que representa la energía consumida y correspondiente a cada profundidad de penetración.

El grado de precisión es muy elevado por lo que en la gráfica se detectan, incluso, las variaciones de dureza de la madera de primavera y la de verano de cada anillo que atraviesa. Así mismo permite detectar cualquier zona en la que la resistencia a la penetración se aparta de los valores medios.

El resistógrafo se utiliza para el estudio de estructuras antiguas (Rinn 1994, Brashaw 2005a, Feio et al. 2005, Alvarez et al. 2005, Ramón 2007, Calderoni 2010) y para la detección de daños internos en árboles vivos, para prevenir accidentes por roturas y caídas de los mismos (Bethge et al. 1996, Costello et al. 1999, Isik et al. 2003, Tseng 2004, Johnstone 2007). También se ha utilizado mucho en la inspección de las estructuras de los puentes de madera en los EEUU combinando sus resultados con los de las pruebas de vibraciones o ultrasonidos (Brashaw et al. 2005).

Actualmente se está trabajando en la determinación de la densidad de la madera mediante el uso del resistógrafo (Rinn, 1996a, 1996b, Mariño et al, 2002, Casado et al 2009).

e) Esclerómetro Schmidt

Se trata de una herramienta muy utilizada en el ámbito de la diagnosis de estructuras de hormigón. Se basa en la medición del índice de rebote que genera el impacto de una masa metálica, impulsada por un muelle, con una energía conocida, sobre un vástago metálico que golpea el hormigón. El resultado del ensayo es el índice de rebote y se mide en una ventana lateral del aparato.

Los resultados de este ensayo están directamente relacionados con la dureza superficial. Numerosos trabajos han desarrollado la relación entre este parámetro y la resistencia del hormigón.

Actualmente se están llevando a cabo investigaciones para hacer algo similar en el campo de la madera pero sin haber llegado a obtener resultados similares a los del hormigón (Soriano et al. 2011)

CAPÍTULO 4:

MÉTODOS Y EQUIPOS UTILIZADOS

Los medios y equipos utilizados durante las diferentes fases del desarrollo de los trabajos de esta tesis pertenecen, principalmente al *Laboratori de Materials de L'Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (EPSEB)* de la UPC, al grupo de Cálculo de Estructuras del Departamento de Construcción y Vías Rurales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la UPM y del *Institut Català de la Fusta (INCAFUST)*.

4.1. Equipo Humano

El equipo humano, sin el cual habría sido imposible llevar a cabo este trabajo esta formado por las siguientes personas:

Todo el personal del Laboratori de Materials de la EPSEB, Francisco Arriaga, Miguel Esteban y Guillermo Íñiguez del Grupo de Construcción con Madera de la UPM, Rubén Plensa, Jordi Farràs de la EPSEB, Jordi Gene, Eduard Correa, Marcel Vilches el INCAFUST, al personal del Servei de Manteniment de la EPSEB y a todas aquellas personas sin cuya ayuda no se hubiera podido realizar toda la fase experimental.

4.2. Pórtico de ensayos mecánicos

Para la realización de este trabajo se utilizó el pórtico del laboratorio de la EPSEB que para este trabajo contaba con los siguientes elementos:

4.2.1. Pórtico. El pórtico admite vigas de longitud máxima entre apoyos de 5,8 m, la capacidad de carga es de 60 kN y el desplazamiento vertical está limitado al del pistón, 900 mm. En la figura 4.1 se puede ver el pórtico de ensayos con un puente superior diferente del utilizado en nuestros ensayos.

4.2.2. Cilindro oleohidráulico Norgen Martonair (CEDISA) modelo HDS-016125/950/B con 900 mm de recorrido.

4.2.3. Puente superior diseñado por el Laboratorio de Materiales de la EPSEB y construido para estos ensayos por los *Serveis Comuns* de la UPC. En la figura 4.2 se puede apreciar el puente y los elementos que lo forman.



Figura 4.1 Pórtico de ensayos de la EPSEB



Figura 4.2 Puente superior y célula de carga

4.2.4. Célula de carga

Se trata de una célula de carga Utilcell modelo 750 20 con una carga máxima nominal de 200 kN con una resolución de 0,023 kN, figura 4.2

4.2.5. Extensómetros

Los extensómetros usados son de la marca APEK MPE, tipo HS/100 de 102 mm de recorrido, con una sensibilidad de 0,001 mm y una precisión de 0,01 mm, figura 4.3.



Figura 4.3 Extensómetros APEK

4.2.6. Perchas

Las perchas usadas para el ensayo de Módulo Local fueron diseñadas por el Laboratorio de Materiales de la EPSEB para poder albergar los extensómetros APEK MPE como se puede apreciar en la figura 4.4 .



Figura 4.4 Perchas para la medición del módulo de elasticidad local

4.2.7. Sistema de adquisición de datos

Se trata de un sistema de la empresa NATIONAL INSTRUMENTS compuesto por un chasis SCXI-1000 con un módulo de conexión a PC vía USB; SCXI-1600 y un módulo SCXI-1100 que permite la conexión de hasta 32 sensores analógicos. En la figura 4.5 se pueden apreciar los componentes del equipo. Los programas que gestionan todo el sistema pertenecen al paquete LABVIEW 2009.



Figura 4.5 Sistema de adquisición de datos National Instruments

4.3. Equipo de ultrasonidos

Se trata del Sylvatest Duo de la empresa CBS-CTB compuesto por un emisor, un receptor y un terminal de control y lectura de datos. Trabaja a 22 kHz y que está diseñado específicamente para madera.

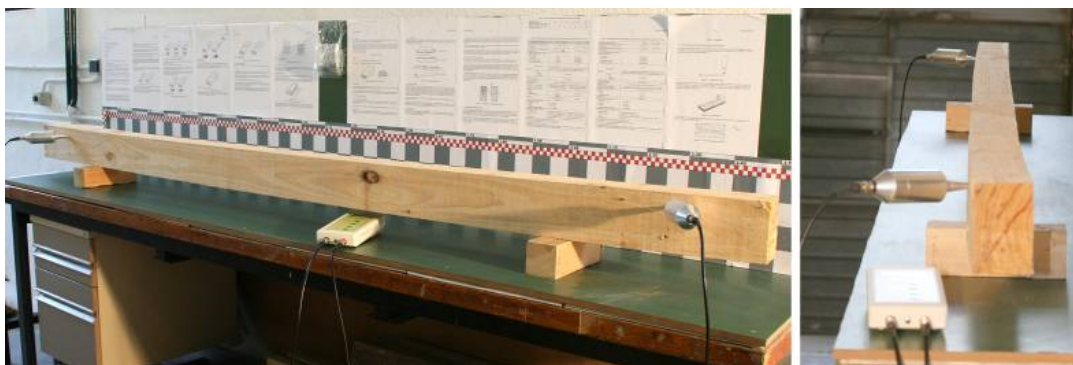


Figura 4.6 Equipo Sylvatest Duo de CBS-CTB

El ensayo consiste en medir el tiempo que tarda en llegar una pulso ultrasónico emitido por el emisor, hasta el receptor. Para conseguir el perfecto contacto entre los palpadores y la madera los palpadores acaban en unas puntas cónicas que se introducen en la madera, tras realizar en la misma unos orificios con una broca especial que suministra el fabricante, garantizando un contacto perfecto, figura 4.6.

4.4. Equipo de medición de velocidad de ondas

El Microsekond Timer (MST) de la empresa Fakopp es un equipo que está compuesto por dos transductores y un terminal que registra tiempos, en μs .

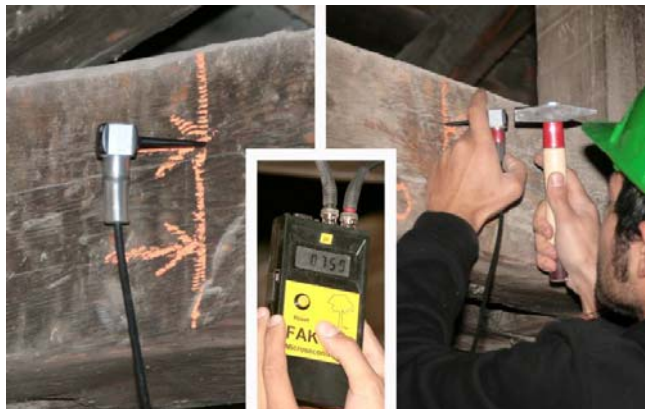


Figura 4.7 Equipo Microsekond Timer de Fakopp

El ensayo consiste en medir el tiempo que tarda en llegar una onda emitida al golpear con un martillo en el transductor emisor hasta el transductor receptor.

Como se puede apreciar en la figura 4.7 los transductores se clavan directamente en la madera no necesitando ni taladros ni geles para garantizar un contacto perfecto con la madera.

4.5. Equipo de análisis de vibración

El Portable Lumber Grader (PLG) de la empresa Fakopp es el equipo usado para realizar este ensayo, también conocido como ensayo de vibraciones inducidas, el cual registra la frecuencia de resonancia producida por el impacto de un martillo en la pieza de madera, que junto con la

masa obtenida por una báscula conectada al ordenador y otros datos que introduce el operador proporciona el módulo de elasticidad dinámico y asigna una Clase Resistente a la pieza.



Figura 4.8 Equipo Portable Lumber Grader de Fakopp

Como se puede apreciar en la figura 4.8, el equipo está compuesto por un ordenador con el software del fabricante, una balanza conectada al ordenador que determina la masa de la pieza estudiada con una precisión de 1 g y un micrófono conectado al ordenador.

4.6. Penetrómetro

Se trata del penetrómetro Pilodyn 6J de la empresa Proceq. Como se puede ver en la figura 4.9, consta de un mecanismo que impulsa una varilla metálica, mediante un muelle, que la hace penetrar hasta una cierta profundidad, quedando registrado en una ventana la profundidad a la que ha penetrado en la madera. Se usa tanto para determinar la profundidad de alteraciones superficiales, como por ejemplo un ataque por hongos, así como para determinar, de forma indirecta, la densidad de la madera.

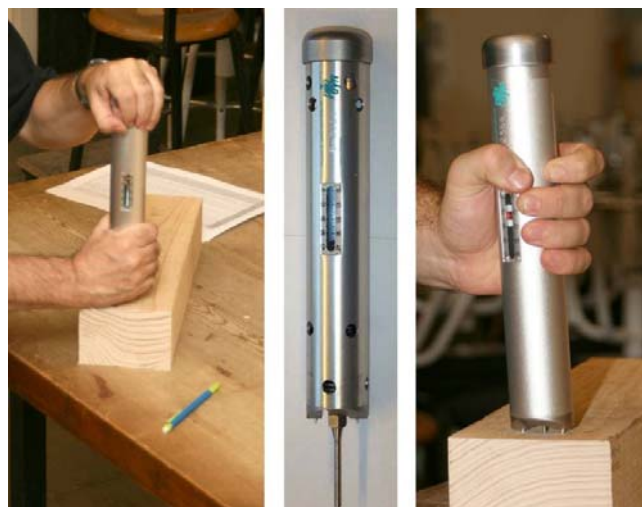


Figura 4.9 Equipo Pilodyn 6J de la empresa Proceq

4.7. Equipo de arranque de tornillo

Se trata del Screw Withdrawal Force Meter o MAT (Máquina de Arranque de Tornillos) de la empresa Fakopp. La máquina consta de una célula de carga accionada por un husillo que mide la fuerza ejercida en cada momento del ensayo registrando en un terminal la máxima fuerza ejercida en el momento del arrancamiento. El tornillo se une a la célula de carga mediante un sistema sujeción de fácil colocación como se aprecia en la figura 4.10.

El ensayo nos da la fuerza necesaria para arrancar un tornillo, introducido en la madera, en unas determinadas condiciones. Este ensayo permite obtener, de forma indirecta, la densidad de la madera.



Figura 4.10 Equipo Screw Withdrawal Force Meter de la empresa Fakopp

4.8. Esclerómetro

El esclerómetro o martillo Schmitdt es un instrumento desarrollado para la determinación de la dureza superficial del mortero y hormigón. Consiste en un mecanismo en el que una masa metálica, impulsada por un muelle, golpea el hormigón mediante un vástago metálico, con una energía definida. Este rebote se mide en una ventana lateral del aparato. Introduciendo este valor en unas tablas se determina la resistencia a la compresión del hormigón. En este trabajo se ha utilizado golpeando sobre las piezas de madera para determinar su posible utilidad para obtener la densidad de la misma, figura 4.11.



Figura 4.11 Esclerómetro Schmidt

4.9. Sondeo con Resistógrafo

El Resistógrafo es un taladro que introduce en la madera una broca muy fina y larga a velocidad constante. Registra la energía consumida para mantener esta velocidad constante y la relaciona con la resistencia a la penetración imprimiéndola en un gráfico.

Detecta variaciones de dureza como la de la madera de primavera y verano de cada anillo así como alteraciones en el interior de la madera: cavidades como galerías de carcomas o termitas, ablandamientos por pudrición y otras alteraciones.

En la figura 4.12 podemos ver el RESISTOGRAPH 4453 P de la empresa Rinntech



Figura 4.12 RESISTOGRAPH 4453 P de la empresa Rinntech

Otros medios y equipos diversos.

Xilohigrómetro

Se trata del xilohigrómetro GANN modelo HYDROMETTE HT 85 T (figura 4.13) de resolución 0,1 % de contenido de humedad. Se ha utilizado para determinar el contenido de humedad de las probetas de acuerdo a lo especificado en la norma UNE-EN 13183-2: 2002.



Figura 4.13 Xilohigrómetro HYDROMETTE HT 85 T de GANN

Balanzas

Para el obtener la masa de las piezas enteras, así como la masa y humedad de las probetas ensayadas en la estufa, se han utilizado las siguientes balanzas electrónicas:

- Balanza GRAM HGM-20K con una capacidad de carga de 20.000 g y una precisión de 1,0 g para el pesado de las piezas enteras.



Figura 4.14 Balanza GENIWEIGHER RS 224-3704 ST

- Balanza GENIWEIGHER RS 224-3704 ST, en la figura 4,14, con una capacidad de carga de 1.100 g y una precisión de 0,1 g para el pesado de las probetas de secado en estufa

- Balanza GRAM ST 510 con una capacidad de carga de 510 g y una precisión de 1 mg.

Estufa

Se ha empleado una estufa de la marca SELECTA modelo 297D con circulación forzada de aire, con dimensiones internas de 60x60x80 cm y regulación de temperaturas entre 20 y 200 °C

para determinar el contenido de humedad de las probetas a 103 ± 2 °C según la norma UNE-EN 13183-1:2002, figura 4.15.



Figura 4.15 Estufa de la marca SELECTA modelo 297D

Flexómetros

Se han utilizado flexómetros de 3 y 5 m de longitud con precisión de 1,0 mm.

Calibre digital

En la figura 4.16 podemos ver el calibre utilizado de la marca Storm de rango 0-200 mm con resolución de 0,01 mm y una precisión de 0,03 mm.



Figura 4.16 Calibre digital Storm

Se ha usado para determinar las dimensiones de las piezas y ubicar y medir las particularidades de las mismas.

Mesa de trabajo

Se construyó una mesa de trabajo con la superficie horizontal y la pared posterior planas, controladas mediante una regla de 2,5 m. Utilizada para evaluar las deformaciones en la fase de clasificación visual, figura 4.17. También se utilizó para fotografiar las piezas.



Figura 4.17 Mesa de trabajo

Reglas milimetradas flexibles

Se han utilizado galgas de acero flexibles de 25 cm con precisión de 0,2 mm usadas para medir la profundidad de las fendas.

Escuadra de carpintero de 30 cm

Trazador

Usado para medir la inclinación de las fibras tal y como lo define la norma UNE-EN 131: 1997 tal y como se aprecia en la figura 4.18.



Figura 4.18 Trazador

Taladros Makita utilizados para realizar las perforaciones para alojar los palpadores del equipo Sylvatest Duo de ultrasonidos.

Fotografía y vídeo

Cámara fotográfica Canon EOS 450 D

Cámara de vídeo de alta definición JVC GY-HM100

Cámara de vídeo JVC GZ-MG155

Calibración de los equipos

Para la calibración de las prensas el Laboratorio dispone de una célula de carga de control, que se verifica periódicamente, que se usa para calibrar las distintas prensas del laboratorio. La célula utilizada en el pórtico se verificó antes de comenzar los ensayos y otra vez durante el periodo de ensayos.

Para la calibración de los extensómetros y otros elementos de medida se dispone de un juego de bloques patrón (galgas) de la marca Mitutoyo 516-964 BM1-D47-2. Los extensómetros se verificaron antes de comenzar el trabajo, otra vez a lo largo del proceso y cada vez que un extensómetro recibía un impacto o golpe.

CAPÍTULO 5:

METODOLOGÍA

5.1. Material de ensayo

El material ensayado está compuesto por 150 piezas de madera de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) con unas dimensiones transversales de 80x120 mm y una longitud de aproximada de 250 cm.

La madera procede de la finca denominada Can Massaneda en Santa Coloma de Farners, muy cerca del Montseny.

Santa Coloma de Farners se halla en el extremo nordeste de la cordillera Prelitoral, en la depresión de La Selva. Geológicamente, se halla en una zona formada por rocas graníticas hercinianas, que actualmente forman montañas redondeadas, rodeadas de rocas metamórficas, mucho más resistentes que los antiguos granitos, y que actualmente forman crestas agudas (Matagalls y Les Agudes). El fondo del valle se halla recubierto por materiales sedimentarios recientes (terrazas de la propia riera de Santa Coloma y materiales aluviales actuales). Con esta composición geológica se obtiene un suelo ácido; este hecho unido a una elevada pluviometría, producen suelos tipo xéricos, donde viven encinares, castañedos y plantaciones de coníferas.

Las piezas fueron elegidas aleatoriamente de una partida comercial con origen en la citada finca, de árboles de 35 a 50 años.

5.2. Desarrollo experimental

El trabajo experimental de la tesis se divide en dos fases, la primera que incluye todos los pasos necesarios para la clasificación visual y también la realización del catálogo fotográfico. La segunda fase incluye los ensayos necesarios para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas.

La primera fase incluyó los siguientes procesos:

- Numeración de las 150 piezas y a su vez la numeración de las cuatro caras de cada una. La posición de la cara superior se hizo de forma aleatoria entre los cantos de la pieza.
- Medición de la longitud media de cada probeta y de la sección de la misma en el centro y en los dos extremos.
- Marcado de las secciones correspondientes a 6 h y 12 h en el canto superior, 0 h y 18 h en el canto inferior y los puntos que marcan 5 h (2,5 h respecto al centro de la pieza) en las dos caras siendo h el canto de la pieza.

- Medición del contenido de humedad de cada pieza con el xilohigrómetro, midiendo en el canto superior en la zona central de la misma, de acuerdo a lo estipulado en la norma UNE-EN 13183-2: 2002.
- Determinación de la masa de cada probeta mediante pesado en báscula.
- Registro de los parámetros necesarios para la clasificación visual.
- Medición del tiempo de transmisión de onda ultrasónica mediante la lectura directa testa a testa y de caras cruzadas e indirecta de la misma cara, estas últimas a distancias de 18 h.
- Medición del tiempo de transmisión de onda de impacto mediante la lectura directa testa a testa y de caras cruzadas e indirecta de la misma cara, estas últimas a distancias de 18 h.
- Registro de la frecuencia natural de vibración longitudinal mediante impacto en la testa de la probeta.
- Registro de la frecuencia natural de vibración transversal mediante impacto en la zona central de la probeta.
- Realización del catálogo fotográfico de las piezas consistente en la realización de una base de datos fotográfica que permitirá analizar todas las piezas (una vez ensayadas y rotas) de acuerdo a futuras normativas o bien a normativas de otros países.

En la segunda fase se realizaron, entre otros, los ensayos mecánicos que incluyeron las siguientes pruebas:

- Cálculo de los módulos de elasticidad local y global mediante el ensayo de flexión de acuerdo a lo estipulado en la norma UNE-EN 408: 2011.
- Cálculo de la resistencia a flexión de acuerdo a lo estipulado en la norma UNE-EN 408:2011.
- Localización y registro de la zona de rotura mediante fotografías, filmación en video y posterior croquis de la misma registrando las particularidades presentes en la zona como nudos y otras particularidades.
- Determinación del contenido de humedad en la zona de rotura de la pieza mediante la utilización del xilohigrómetro, de acuerdo con la norma UNE-EN 13183-2:2002
- Extracción de dos rebanadas, lo más próximas a la zona de rotura de la pieza, una de 15 cm y otra de 40 cm de longitud.
 - Rebanada A (de 15 cm): se realizan la numeración, la toma de dimensiones, la medición de su masa y la determinación del contenido de humedad mediante secado en estufa de acuerdo con la norma UNE-EN 13183-1: 2002
 - Rebanada B (de 40 cm): numeración, registro de dimensiones, medición de la profundidad de penetración y registro de la resistencia al arrancamiento de tornillo. Ambas pruebas, penetración y tornillo, en dirección radial y tangencial.

- Extracción de probetas testigo. Una en dirección radial y otra en dirección tangencial de 60 piezas, total 120 probetas.

5.3. Determinación de las propiedades físicas

5.3.1. Determinación del contenido de humedad

La determinación del contenido de humedad de las probetas se realizó mediante dos técnicas: utilización del xilohigrómetro eléctrico según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13183-2:2002 y mediante secado en estufa de acuerdo a lo especificado en la norma UNE-EN 13183-1:2002

Debido a que el proceso de ensayos a los que se sometió a las piezas fue muy largo, lo que podía dar lugar a variaciones apreciables en los contenidos de humedad de las probetas, se optó por medir los contenidos de humedad de las mismas, mediante el xilohigrómetro, tres veces a lo largo del proceso de ensayos.

La primera medición, Hum. I, se realizó durante la primera fase de ensayos; clasificación visual y ensayo de transmisión de onda de impacto Microsecond Timer (M.S.T.).

La segunda medición, Hum. II, se realizó durante la fase de los ensayos de transmisión de onda ultrasónica (Sylvatest) y análisis de vibraciones longitudinales y transversales Portable Lumber Grader (P.L.G).

La tercera toma de humedades, Hum. III, se realizó inmediatamente justo antes de los ensayos de flexión.

Y una cuarta humedad, Hum. IV, se determinó, tras la rotura de las piezas mediante secado en estufa de las rebanadas de 15 cm. La importancia de la medición del contenido de humedad en cada fase de los ensayos viene determinada por la influencia que el contenido de humedad tiene en las propiedades físicas y mecánicas, especialmente las variaciones de contenido de agua de saturación, es decir, las variaciones de humedades por debajo del punto de saturación de las fibras (que suele considerarse alrededor del 30%).

En la tabla 5.1 figuran los valores medios del contenido de humedad en las 4 diferentes fases de los ensayos.

Hum. I (%)	Hum. II (%)	Hum. III (%)	Hum. IV (%)
CV (%)	CV (%)	CV (%)	CV (%)
11,4	11,1	12,0	10,5
18,6	12,5	7,5	6,5

Tabla 5.1. Contenido medio de humedad en las cuatro mediciones.

De acuerdo a la metodología establecida en la norma UNE-EN 408: 2004, el contenido de humedad y la densidad de las probetas se toman de una rebanada de sección completa, libre de nudos y bolsas de resina obtenida de acuerdo a la norma UNE-EN 13183-1:2002

Dado que el número de piezas a secar, 150, de aprox 150x120x80 mm y el tamaño de las estufas lo permitían se secaron todas las rebanadas simultáneamente.

En la tabla 5.2 se aprecia la diferencia del contenido de humedad medio medido mediante xilohigrómetro y con estufa.

Xilohigrómetro % Hum III	Estufa % Hum IV	Diferencia %
11,5	10,5	8,7

Tabla 5.2. Diferencia entre los valores medios de humedad medidos con xilohigrómetro y con estufa

Como se puede apreciar las diferencias entre los valores medios de contenido de humedad no sobrepasan el 9 %, es decir inferiores a un punto, por lo que cualquiera de los dos métodos se pueden considerar suficientemente precisos.

5.3.2 Determinación de la densidad

La densidad de las probetas se determinó por dos procesos diferentes. En el primero se pesaron las muestras, enteras, en una báscula de laboratorio y a continuación se tomaron las dimensiones de las probetas de acuerdo a la norma UNE-EN 1309-1: 1997 tomando la sección en tres puntos diferentes: uno en la zona central y los otros dos a unos 20 cm de los extremos y siempre en zonas libres de defectos. En cuanto a la longitud se tomó la correspondiente al mayor paralelepípedo rectángulo que se pudo inscribir en la muestra. A partir de este volumen y esta masa se obtuvo la densidad, que se denominó densidad global.

El segundo método es el que propone la norma UNE-EN 408: 2011 que indica que se ha de extraer una rebanada de la sección transversal completa de 15 cm de longitud, libre de nudos y bolsas de resina. Tras medir la masa y el volumen se obtiene la densidad local de la pieza.

Los valores obtenidos por ambos métodos se corrigen a la humedad de referencia del 12 % de acuerdo a la norma UNE-EN 384: 2010 que indica que cuando el contenido de humedad sea mayor del 12%, la densidad debe disminuirse un 0,5% por cada variación del 1% del contenido de humedad, y cuando el contenido de humedad sea menor del 12%, la densidad debe aumentarse un 0,5% por cada 1% de variación del contenido de humedad,

5.4. Clasificación visual

La norma UNE 56544: 2011 establece un sistema de clasificación visual para la madera aserrada de uso estructural aplicable a las siguientes especies: Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), Pino laricio (*Pinus nigra* Arn.var. *Salmannii*) Pino gallego y pino pinaster de la meseta (*Pinus pinaster* Ait.) y Pino insigne (*Pinus radiata* D. Don). Dicha norma en su versión de 2007

establece tres calidades, visuales: dos para piezas con grosor menor o igual a 70 mm; ME-1 y ME-2 y una para piezas con un grosor mayor que 70 mm, la clase MEG.

Los parámetros analizados en la clasificación visual son los siguientes:

- Diámetro de los nudos sobre la cara.
- Diámetro de los nudos sobre el canto.
- Diámetro máximo de nudos de de arista.
- Posición y magnitud de la peor sección por nudosidad.
- Anchura de los anillos de crecimiento.
- Presencia de fendas y medición de su longitud y profundidad.
- Longitud de las bolsas de resina.
- Longitud del entrecasco.
- Longitud y profundidad de las gemas.
- Presencia de médula.
- Presencia de madera de compresión.
- Medición de la desviación de la fibra.
- Medición de deformaciones: curvatura de cara, canto alabeo y atejado.
- Presencia de alteraciones biológicas.

En la tabla 5.3 podemos ver las especificaciones para la clasificación de las piezas de espesor \leq 70 mm y en la tabla 5.4 especificaciones para la clasificación de las piezas de espesor $>$ 70 mm.

CRITERIOS DE CALIDAD		ME-1	ME-2
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA 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⁾ - Pino silvestre - Pino laricio - Pino gallego y pinaster - Pino insigne (radiata)		≤ 4 mm ≤ 5 mm ≤ 8 mm ≤ 10 mm	Sin limitación Sin limitación Sin limitación Sin limitación
FENDAS	De secado ^{(2) (3)}	$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
	- Rayo - Heladura - Abatimiento	No permitidas	
ACEBOLLADURAS		No permitidas	
BOLSAS DE RESINA y ENTRECASCO		Se admiten si su longitud es menor o igual que $1,5 \cdot "h"$	
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 - dimensión relativa		$\leq 1/4$ de "L" $g \leq 1/4$	$\leq 1/3$ de "L" $g \leq 1/3$
MÉDULA ⁽¹⁾		Admitida No admitida si se clasifica en húmedo	Admitida
ALTERACIONES BIOLÓGICAS - Muérdago (<i>V. album</i>) - Azulado - Pudrición - Galerías de insectos xilófagos		- No se admite - Se admite - No se admite - No se admiten	
DEFORMACIONES MÁXIMAS ^{(2) (3) (4)} - Curvatura de cara - Curvatura de canto - Alabeo - Abarquillado		10 mm (para una longitud de 2 m) 8 mm (para una longitud de 2 m) 1 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m) sin limitación	20 mm (para una longitud de 2 m) 12 mm (para una longitud de 2 m) 2 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m) sin limitación
(1) Estos criterios sólo se considerarán cuando se comercializa en húmedo. (2) Estos criterios no se considerarán cuando la clasificación se efectúa en húmedo. (3) Referidas a un 20% de contenido de humedad. (4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.			

Tabla 5.3. Especificaciones de la norma UNE 56544: 2011 para piezas de espesor ≤ 70 mm

CRITERIOS DE CALIDAD		MEG
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA (h)		$d \leq 2/3$ de "h"
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO (b)		$d \leq 2/3$ de "b"
ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO ⁽¹⁾ <ul style="list-style-type: none"> - Pino silvestre - Pino laricio - Pino gallego y pinaster - Pino insigne (radiata) 		Sin limitación Sin limitación Sin limitación Sin limitación
FENDAS	De secado ^{(2) (3)}	$f \leq 3/5$ Las fendas de contracción sólo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: 1/4 de la longitud de la pieza y 1 m.
	<ul style="list-style-type: none"> - Rayo - Heladura - Abatimiento 	No permitidas
ACEBOLLADURAS		No permitidas
BOLSAS DE RESINA y ENTRECASCO		Se admiten si su longitud es menor o igual que $1,5 \cdot "h"$
MADERA DE COMPRESIÓN		Admisible en 2/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza
DESVIACIÓN DE LA FIBRA		1:6 (16,7%)
GEMAS <ul style="list-style-type: none"> - longitud - dimensión relativa 		$\leq 1/3$ de "L" $g \leq 1/3$
MÉDULA ⁽¹⁾		Admitida
ALTERACIONES BIOLÓGICAS <ul style="list-style-type: none"> - Muérdago (<i>V. album</i>) - Azulado - Pudrición - Galerías de insectos xilófagos 		<ul style="list-style-type: none"> - No se admite - Se admite - No se admite - No se admiten
DEFORMACIONES MÁXIMAS ^{(2) (3) (4) (5)} <ul style="list-style-type: none"> - Curvatura de cara - Curvatura de canto - Alabeo - Abarquillado 		<ul style="list-style-type: none"> 20 (10) mm (para una longitud de 2 m) 12 (8) mm (para una longitud de 2 m) 2 (1) mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m) sin limitación
<p>(1) Estos criterios sólo se considerarán cuando se comercializa en húmedo.</p> <p>(2) Estos criterios no se considerarán cuando la clasificación se efectúa en húmedo.</p> <p>(3) Referidas a un 20% de contenido de humedad.</p> <p>(4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.</p> <p>(5) Se tomarán los valores más exigentes indicados entre paréntesis, cuando la calidad MEG de lugar a una clase resistente superior a C18</p>		

Tabla 5.4. Especificaciones de la norma UNE 56544: 2011 para piezas de espesor > 70 mm

Aplicando dicha norma a la muestra examinada los resultados son los que se exponen en la tabla 5.5.

Sección mm	MEG		Rechazo	
	Nº piezas	%	Nº piezas	%
80 x 120	78	53	72	47

Tabla 5.5. Rendimientos de clasificación visual de acuerdo a la norma UNE 56544: 2011 para una clase resistente inferior a C18

Dado que la dimensión de las probetas estaba muy próxima a la frontera entre pequeña y gran escuadría, los 70 mm de grosor; se procedió a clasificarlas como pertenecientes a pequeña escuadría obteniendo los valores que se reflejan a continuación en la tabla 5.6.

ME-1		ME-2		Rechazo	
Nº piezas	%	Nº piezas	%	Nº de piezas	%
5	3,3	62	41,3	83	55,4

Tabla 5.6. Rendimientos de clasificación visual de acuerdo a la norma UNE 56544: 2011 considerando las probetas como de pequeña escuadría

Como puede apreciarse, en el primer caso, el porcentaje de rechazo, 47 %, es demasiado elevado para un aprovechamiento industrial de la madera de pino radiata de gran escuadría para uso estructural. Aplicando los criterios de clasificación como pequeña escuadría podemos ver que el rendimiento no mejora; 55,4 % de rechazos y solo un escaso 3,3 % de clase ME-1.

5.5. Profundidad de penetración y estimación de la densidad

Se trata de una técnica considerada no destructiva que mide la profundidad de penetración de una sonda. Para ello se utiliza un equipo desarrollado para la evaluación de la madera tanto árboles en pie como madera puesta en obra.

El equipo utilizado es el Pilodyn 6J Standard con una energía de impacto 6 julios, una profundidad de penetración de 0 a 40 mm de una varilla percutora 2,5 mm diámetro como se puede apreciar en la figura 5.1.



Figura 5.1. Penetrómetro Pilodyn 6J

Mide la oposición a la penetración del material de una varilla metálica. Se ha utilizado para determinar la profundidad de pudrición de postes y de forma indirecta para determinar la densidad de la madera.

La medición se realizó sobre las 150 rebanadas obtenidas de la zona más próxima a la zona de rotura de las 150 probetas, tras el ensayo de flexión. En cada pieza se tomaron dos lecturas de la profundidad de penetración, una en dirección radial y otra en dirección tangencial (en la medida que el aserrado de la pieza lo permitía) tal y como se aprecia en la figura 5.2.



Figura 5.2. Penetración en dirección radial y tangencial

El procedimiento de ensayo es muy sencillo, en primer lugar se comprime el muelle con ayuda de una baqueta quedando cargado y listo para el ensayo. A continuación se presiona el extremo opuesto para que el disparador libere el muelle clavándose la varilla en la madera. La profundidad de penetración se puede observar en una ventana con una escala en milímetros, figura 5.3



Figura 5.3. Proceso de ensayo

5.6. Resistencia al arranque de tornillo y estimación de la densidad

Se entiende por ensayo de arrancamiento de tornillo un ensayo no destructivo que consiste en medir la fuerza necesaria para arrancar un tornillo introducido en la madera, lo que proporciona una información de zona muy concreta. Este ensayo se suele utilizar para obtener, de forma indirecta, la densidad de la madera.

El equipo utilizado es el SWFM (Screw Withdrawal Force Meter) también conocido como MAT (Máquina de Arranque de Tornillo) de la empresa Fakopp.

El aparato está compuesto por un chasis de acero, una célula de carga unida a un gancho o garra para tirar del tornillo y un husillo accionado por una maneta giratoria. La célula está unida a un equipo de medida. En la figura 5.4 se puede ver el equipo.

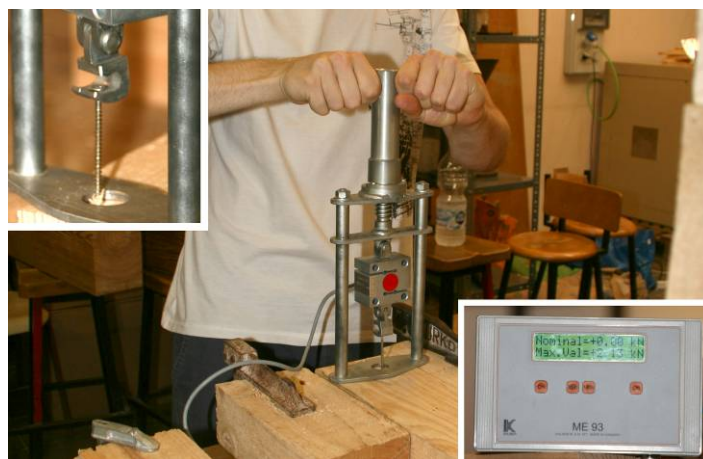


Figura 5.4. Vista general del equipo de arrancamiento (SWFM o MAT)

El procedimiento operativo es el siguiente: primero se introduce, perpendicularmente a la superficie de la madera, un tornillo HECO-FIX Yellow Zinc Plated, en este caso de 70 mm de longitud por 4 mm de diámetro, haciéndolo penetrar, atornillándolo, hasta una profundidad de 20 mm.

Una vez introducido el tornillo se coloca el dispositivo fijando las garras del gancho en el tornillo y después, se hace girar la palanca con una velocidad constante hasta arrancar el tornillo. En la pantalla del equipo de medida se presenta la fuerza que se ejerce durante el ensayo, así como la fuerza máxima ejercida para arrancar el tornillo.

Para obtener unos valores fiables es necesario mantener una velocidad constante de carga durante el ensayo haciendo que este dure entre 4 y 8 segundos.

5.7. Extracción de probetas testigo y determinación de la densidad

Para determinar la densidad de las probetas (vigas) se ha realizado un ensayo consistente en la extracción de probetas testigo mediante el uso de una corona extractora de 22 mm de diámetro

exterior que permite obtener unas muestras de entre 16 y 17 mm de diámetro por una longitud de hasta 37 mm. En la figura 5.5 se puede apreciar el proceso y las probetas testigo extraídas.



Figura 5.5. Extracción de microprobetas

No se puede considerar un ensayo no destructivo puesto que el orificio que deja en la madera es de 22 mm. A pesar de ello se está estudiando su utilidad debido a que las densidades obtenidas mediante este ensayo son bastante más precisas que las obtenidas mediante otros ensayos no destructivos por lo que parece que será útil en estudios de estructuras existentes.

5.8. Tiempo de transmisión de onda ultrasónica

El equipo utilizado es el Sylvatest Duo descrito en el apartado 4.3. Este equipo emite una onda ultrasónica y registra el tiempo transcurrido entre su emisión y recepción, lo que permitirá obtener la velocidad de transmisión de dicha onda en el interior de la madera. Se realizan mediciones de transmisión directas; entre testas y entre caras opuestas, así como mediciones de transmisión indirectas entre dos puntos de la misma cara.

La metodología del ensayo fue la siguiente:

En primer lugar se realizaron los taladros necesarios para garantizar el buen contacto entre los palpadores y la madera. Para ello se utiliza una broca especial que suministra el fabricante y que garantiza que la geometría del orificio y de la punta del palpador son iguales y el contacto es perfecto.

Una vez realizados los orificios se inserta en ellos el palpador emisor y el palpador receptor y a continuación se activa, desde el terminal del equipo, la emisión de las señales ultrasónicas. El palpador emisor emite cuatro pulsos que son recibidos por el palpador receptor. La media de esos cuatro pulsos queda reflejada en la pantalla del terminal dando en microsegundos el tiempo empleado en recorrer la distancia que separa los palpadores. Con esta información de tiempo más la distancia a la que se han colocado los palpadores se obtiene la velocidad de transmisión, figura 5.6.



Figura 5.6. Equipo Sylvatest Duo

Además de los cuatro pulsos antes citados la máquina emite otros cuatro pulsos que el equipo utiliza para estimar la señal máxima o pico, valor que expresa en milivoltios. Este valor es muy dependiente de la calidad del contacto entre el palpador y la madera, así como de la presión ejercida. En las mediciones prácticas (sin control de la presión de contacto) la medición arroja resultados muy variables y de poca fiabilidad. Por este motivo no se han registrado en este trabajo.

El orden de las lecturas fue el siguiente:

Lecturas directas, de testa a testa. Se hicieron 2 lecturas colocando los palpadores en una línea vertical en el centro de la testa. Una a 3 cm de la cara superior y la otra a 3 cm de la cara inferior como se puede observar en la figura 5.7

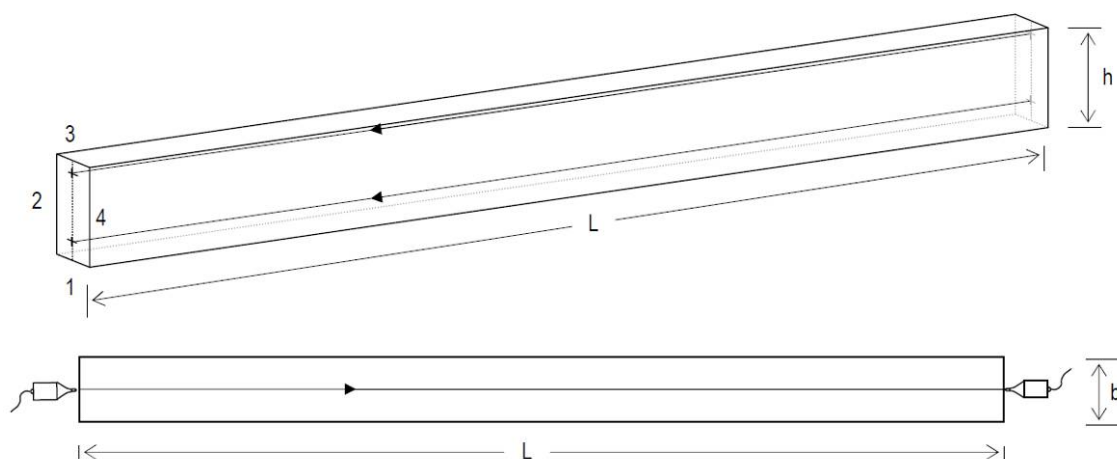


Figura 5.7. Medición del tiempo de propagación directa de la onda en lectura directa de testa a testa

En segundo lugar se realizaron las mediciones directas de velocidad entre caras opuestas. Los palpadores se colocaron a una distancia de 18 veces h siendo h el canto de la sección. Al igual

que en el caso anterior se realizaron lecturas a 3 cm de la cara superior y a 3 cm de la cara inferior, tomando un total cuatro lecturas, como se puede observar en la figura 5.8

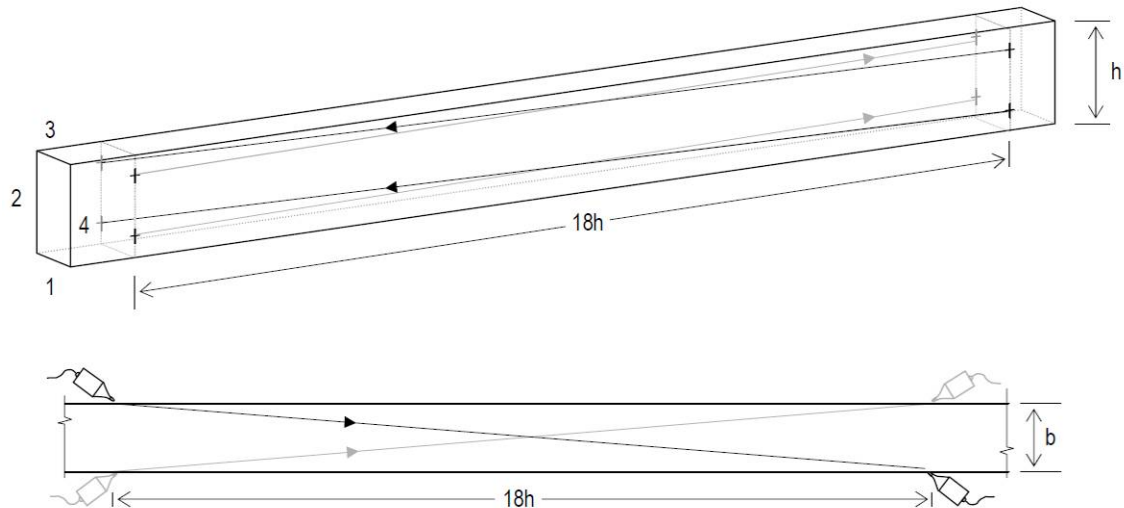


Figura 5.8. Medición del tiempo de propagación directa de la onda entre caras opuestas a una distancia de $18h$

Por último se realizaron lecturas a 18 veces h pero con los palpadores en la misma cara obteniéndose unos valores de lectura indirecta, Figura 5.9.

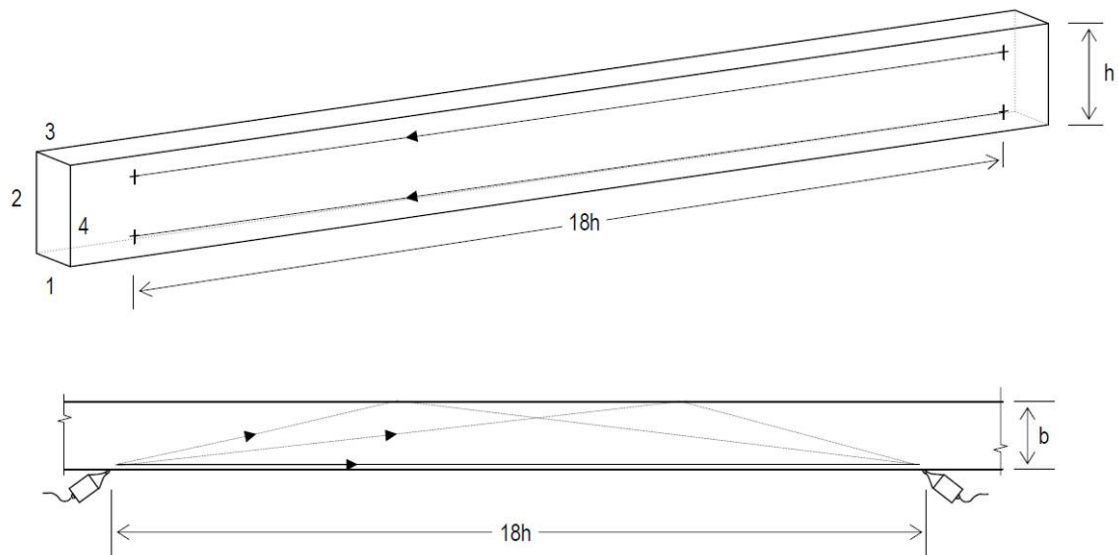


Figura 5.9. Medición del tiempo de propagación indirecta de la onda entre caras opuestas a una distancia de $18h$

En todos los casos se tomó el valor de la media aritmética de las lecturas efectuadas.

El objetivo de las lecturas entre caras es poder compararlas con las lecturas testa a testa ya que cuando estas técnicas se aplican en el estudio de estructuras existentes, raramente se puede acceder a las testas para colocar los palpadores. Por ello es muy importante encontrar las

relaciones entre los distintos tipos de lecturas pues lo más habitual es realizar lecturas entre caras.

Como el contenido de humedad influye en la propagación de la onda ultrasónica los valores de la velocidad se han de corregir por su humedad en el momento de la prueba al valor de referencia del 12 %. Cada incremento del 1% de humedad, sobre el 12%, produce una disminución de velocidad de un 0,8% manteniéndose una relación lineal entre el 5% y el 30% de contenido de humedad (Sandoz 1989).

5.9. Tiempo de transmisión de onda de impacto

Para la determinación de la velocidad de transmisión de ondas de impacto se utiliza el equipo Microsecond Timer de Fakopp. El ensayo se parece mucho al anterior, de ultrasonidos, pero con algunas diferencias sustanciales.

La primera es que no trabaja en las frecuencias de ultrasonidos. La segunda es que los palpadores emisor y receptor no necesitan un taladro previo, tienen unas puntas de acero que al clavarlas en la madera garantizan el perfecto contacto entre los palpadores y la madera. La tercera es que la forma de producir la onda es muy diferente del caso anterior. En este caso se producen golpeando con un martillo el palpador emisor que por medio de un acelerómetro ubicado en su interior emite un impulso eléctrico cada vez que se le golpea con el martillo que pone en marcha el contador de tiempo. El palpador receptor recibe la onda de impacto, otro acelerómetro detecta la señal de fin del contador de tiempo y el terminal del aparato muestra en una pantalla el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la onda acústica en microsegundos, figura 5.10.

La disposición de los palpadores; en las testas, caras cruzadas y lectura indirecta en la misma cara son iguales que en el caso de los ultrasonidos tal y como se puede apreciar en las figuras 5.7, 5.8 y 5.9.

La metodología del ensayo es la siguiente:

Se clavan los palpadores-sensores en los puntos señalados (los mismos que para ultrasonidos) con un martillo de nylon para no dañarlos.

Una vez colocados, se enciende el terminal y se golpea, con un martillo metálico el sensor emisor. Este produce una onda que se desplaza a través de la madera hasta llegar al sensor receptor. El tiempo transcurrido queda reflejado en la pantalla del terminal del aparato. Se realiza tres veces la prueba para cada punto y se toma el valor de la media aritmética de las tres lecturas. Conocida la distancia entre los sensores se obtiene la velocidad de transmisión de la onda.



Figura 5.10 Microsecond Timer

Al igual que en el caso anterior, debido a la influencia del contenido de humedad, los resultados se corrigen a un valor de referencia del 12 %. Cada incremento del 1% de humedad, sobre el 12%, produce una disminución de velocidad de un 1%, siendo esta corrección la indicada, de manera general, por el suministrador del equipo.

5.10. Análisis de vibraciones

5.10.1. Frecuencia natural de vibración longitudinal

La frecuencia longitudinal de vibración se determina mediante el uso del equipo Portable Lumber Grader de Fakopp. El equipo consta de una balanza que a la vez hace de apoyo de la probeta, otro apoyo rígido, un micrófono, un martillo y un ordenador con los programas adecuados.

El ensayo se realiza de la siguiente manera:

En primer lugar la probeta se coloca sobre dos apoyos sobre los que hay colocadas unas bandas de espuma de poliuretano flexible que permite la vibración libre de la probeta. Uno de los dos apoyos es además una balanza que mide la mitad de la masa de la pieza y la transmite al programa del ordenador, figura 5.11

Una vez que la pieza está colocada se introducen en el ordenador los siguientes datos: las dimensiones de la pieza, la diferencia del contenido de humedad de la pieza con respecto al valor de referencia del 12% Cada incremento del 1% de humedad, sobre el 12%, produce una disminución de velocidad de un 1%, 0,01(HII-12) y el CKDR (*Concentrated Knot Diameter Ratio*, grado de concentración de nudos) que corresponde al tramo 15 cm de longitud que agrupa los nudos de mayor dimensión (Divos, 2004).

A continuación se hace vibrar la pieza golpeándola con un martillo en la testa opuesta a la que se ha colocado el micrófono. Este capta el sonido procedente de la vibración inducida y la transmite hasta el ordenador donde el programa procesa dicha señal mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) obteniendo la frecuencia de vibración.



Figura 5.11. Ensayo de frecuencia de vibración longitudinal

Una vez conocida la frecuencia de vibración longitudinal f (en Hz) y la longitud de la pieza l (en m) se puede calcular la velocidad de propagación con la siguiente fórmula:

$$v = 2 \cdot l \cdot f \quad (\text{ec. 5.1})$$

A su vez, como se conoce el peso de la mitad de la probeta y las dimensiones de la misma, se obtiene la densidad de la probeta.

$$\rho = \frac{2 \cdot R_{\frac{1}{2}}}{b \cdot h \cdot l} \quad (\text{ec. 5.2})$$

Donde:

ρ : densidad de la probeta en kg/m^3 ;

$R_{\frac{1}{2}}$: la resultante en uno de los apoyos en kg;

b : es la anchura (canto) de la probeta en m;

h : es la altura (cara) de la probeta en m;

l : es la longitud de la probeta en m.

Como tanto la velocidad como la densidad dependen del contenido de humedad se corrigen al valor de referencia del 12 % como se ha indicado anteriormente.

5.10.2. Frecuencia natural de vibración transversal

La probeta se coloca sobre los apoyos a $0,22 L$ de los extremos siendo L la longitud de la pieza. Sobre los apoyos hay colocadas unas bandas de espuma de poliuretano flexible que permiten la vibración libre de la probeta. Como valores de masa y densidad se utilizan los mismos que los obtenidos en el ensayo anterior (Frecuencia natural de vibración longitudinal).

Se coloca el micrófono en la zona central de la probeta sin tocarla. A continuación se golpea mediante un martillo en la zona central de la probeta, captando el micrófono el sonido producido por el impacto y trasladándolo al ordenador que mediante el programa informático procesa la señal y determina la frecuencia de vibración. El módulo de elasticidad dinámico transversal puede calcularse mediante la fórmula:

$$E_{din,t} = \left(\frac{2f_n}{\gamma \cdot \pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{m \cdot l^3}{I} \right) \quad (\text{ec. 5.3})$$

Donde:

$E_{din,t}$: es el módulo de elasticidad dinámico obtenido en flexión en N/mm²;

f_n : es la frecuencia natural de vibración a flexión, siendo "n" el modo (si n= 1 se llama modo básico o fundamental), en Hz;

m : es la masa de la pieza, en kg;

l : es la longitud de la pieza, en m;

γ_n : es la constante igual a $(n+0,5)^2$ para $n \geq 1$, donde "n" es el modo de vibración, y γ_1 igual a 2,267;

I : es el momento de inercia de la sección, en m⁴.

5.11 Preparación de una base de datos-fichas fotográficas

Al comenzar este proyecto se consideró interesante disponer de todos los datos del análisis visual y de los ensayos en algún formato que permitiese revisar cualquier probeta en cualquier momento, incluso después de rota. Por ello se decidió crear un catálogo fotográfico con todas las caras de todas las probetas incluyendo una escala que permitiese medir las singularidades de las piezas que afectan a sus propiedades y su calidad estructural. Entre otras cosas permitirá revisar la clasificación de todas las piezas de acuerdo a los cambios que puedan producirse en las normas de clasificación.

Por tanto este fue uno de los primeros trabajos realizados: fotografiar las cuatro caras de las 150 vigas sobre una bancada, apoyándolas sobre una escala gráfica, figura 5.12.

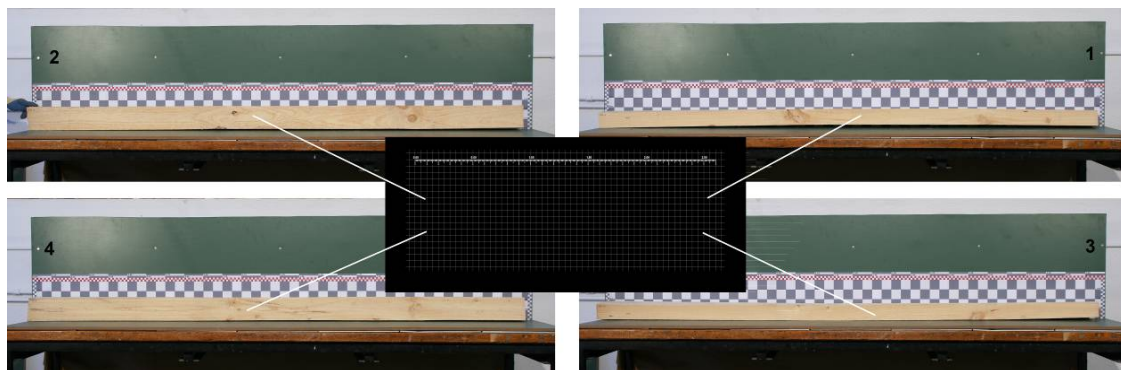


Figura 5.12. Proceso de reproducción fotográfica de las cuatro caras de la probeta

A partir de las fotografías de las cuatro caras, mediante un programa de retoque fotográfico se compuso una única fotografía en la que se ven las cuatro caras sobre fondo negro y con una escala gráfica en centímetros que permite trabajar sobre las fotografías casi como si se trabajase sobre las probetas.

El resultado de cada una de las vigas es similar al ejemplo de la viga PR-005 que se puede ver en la figura 5.13.



Figura 5.13. Resultado final del registro fotográfico de una probeta, PR-005

También se fotografiaron todas las testas como se puede apreciar en la figura 5.14 en fotografía.



Figura 5.14 Cabezas de 50 probetas en las que se marcan en rojo las rechazadas.

5.12. Ensayo mecánico de flexión

Los procedimientos de los ensayos a flexión se realizan de acuerdo la norma UNE-EN 408: 2011

Dichos ensayos tenían por objeto determinar el módulo de elasticidad local en flexión estática, el módulo de elasticidad global en flexión estática y la tensión de rotura.

Previo a la realización de estos ensayos se determinó el contenido de humedad de las probetas mediante el xilohigrómetro (Hum. III) y con este valor se corrigieron los resultados.

La metodología de los tres ensayos requiere que la velocidad de desplazamiento del pistón que ejerce la carga sea constante. La norma especifica que en los ensayos de determinación de los módulos de elasticidad, el pistón de la prensa se desplace a una velocidad constante de no más de 0,003 veces la altura (h) de la probeta en mm/s, por lo tanto, en nuestro caso a una velocidad máxima de 0,36 mm/s.

En el ensayo de tensión de rotura, la probeta tiene que romper en un tiempo de 300 segundos con un margen de ± 120 segundos.

Siguiendo estas premisas, se calibró la velocidad de desplazamiento del pistón sobre los 12 mm/min y se mantuvo durante toda fase de ensayo.

5.12.1. Módulo de elasticidad local

El objetivo de este ensayo es la determinación del módulo de elasticidad en la zona central de la probeta donde sólo existe momento flector (cortante nulo).

El procedimiento de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad local en flexión estática (E_{loc}), consiste al colocar la pieza simplemente apoyada con una luz (l) igual a 18 veces la altura (h) de la sección (en nuestro caso $l = 216$ cm) y, someterla a dos cargas puntuales colocadas a un tercio y dos tercios de la luz tal y como se aprecia en la figura 5.15.

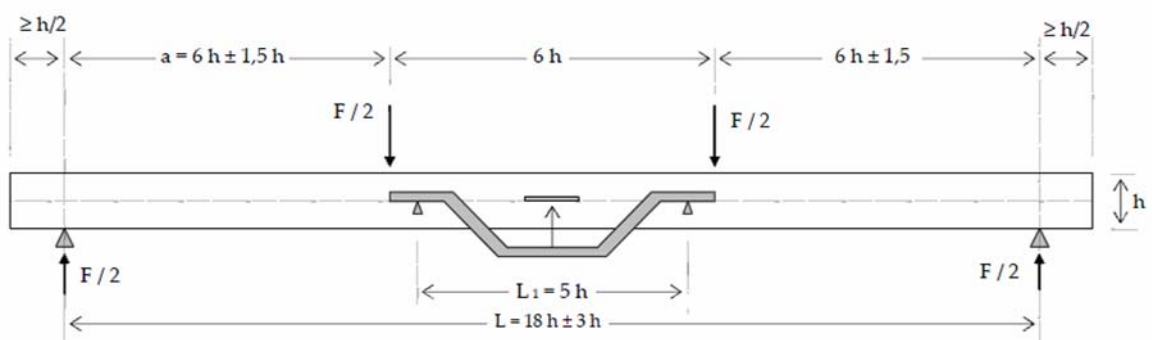


Figura 5.15. Esquema del ensayo de determinación del módulo de elasticidad local

El objetivo del ensayo es medir las deformaciones que se producen en la zona central (l_1) de longitud igual a cinco veces la altura (h) de la pieza, a la altura de la fibra neutra. Para poder hacerlo, hay que fijar los extensómetros encargados de realizar la medición de las deformaciones en unas perchas, uno a cada lado de la pieza, como muestra la figura 5.16. Al colocar uno a cada lado los valores de las deformaciones (w) se obtienen haciendo la media de

los dos valores registrados para cada carga, de este modo se consigue el valor de la deformación independientemente de posibles giros por torsión de la pieza durante el ensayo.



Figura 5.16. Disposición de las perchas soporte de los extensómetros para el ensayo del módulo de elasticidad local

Con esta medición se obtiene la relación entre fuerza y deformación, que permite determinar el módulo de elasticidad local (N/mm^2), libre de cortante. Siguiendo las indicaciones de la norma, se utiliza el tramo comprendido entre el 10 y el 40 % de la carga total (F_{max}) que se estima que puede aguantar la pieza para hacer un análisis de regresión. Dentro de dicho intervalo se busca el tramo más largo que dé un coeficiente de correlación (R^2) de 0,99 o mejor.

En el peor de los casos la condición es que el tramo entre F_1 y F_2 contenga al menos el intervalo entre el 20 y el 30 % de la carga máxima. A partir de estos datos se calcula el módulo de elasticidad local por medio de la siguiente expresión:

$$E_{loc} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot I \cdot (w_2 - w_1)} \quad (\text{ec. 5.4})$$

Dónde:

a : es la distancia en mm entre el punto de apoyo y el punto más próximo de aplicación de la carga (en el ensayo: $a = 720$ mm);

l_1 : es la longitud en mm de la zona central en la que se mide la deformación local (en el ensayo $L1 = 600$ mm);

$F_2 - F_1$: es el incremento de fuerza, en N, producido en el tramo de comportamiento elástico de la pieza sometida a flexión y que corresponde al tramo recto de la gráfica fuerzas / deformaciones de la figura 5.17;

$w_2 - w_1$: es el incremento de las deformaciones, en mm, producidas en el tramo de cargas entre F_2 y F_1 ;

I : es el momento de inercia de la pieza en mm^4 .

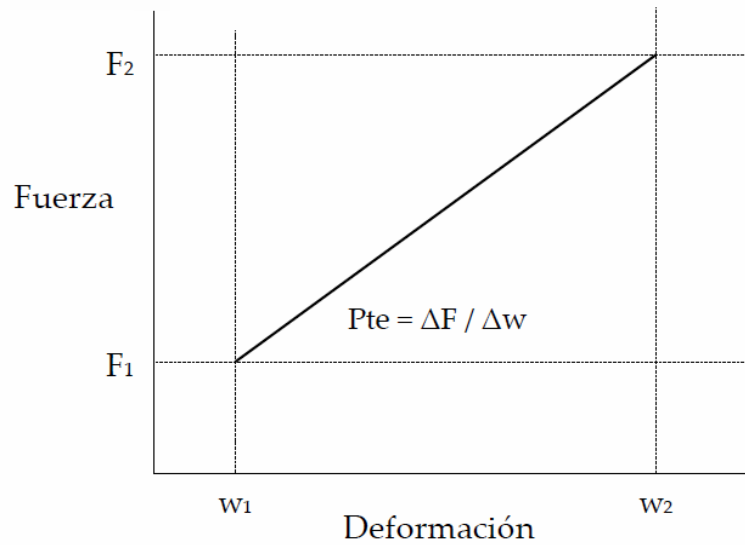


Figura 5.17. Gráfico fuerza / deformación en el tramo elástico

En las condiciones de ensayo descritas, y con los sistemas de captura de datos de que se dispone hoy en día, el término $(F_2 - F_1) / (w_2 - w_1)$ se puede sustituir por la pendiente de la recta de regresión entre fuerzas y deformaciones en su tramo elástico, figura 5.17.

El resultado del cálculo del módulo de elasticidad local a flexión, se tiene que corregir a un contenido de humedad de referencia del 12 % de acuerdo con la norma UNE-EN 384:2010 aumentando el valor en un 1 % para cada 1 % de diferencia respecto a la humedad de referencia.

Este ensayo se realizó sólo en 37 de las 150 probetas, ya que el objetivo buscado no era la asignación de la rigidez de la muestra, sino poder extraer conclusiones al compararlo con el módulo de elasticidad global.

5.12.2. Módulo de elasticidad global

El objetivo del ensayo es la determinación de la rigidez de la madera o lo que es el mismo el módulo de elasticidad de la probeta entera.

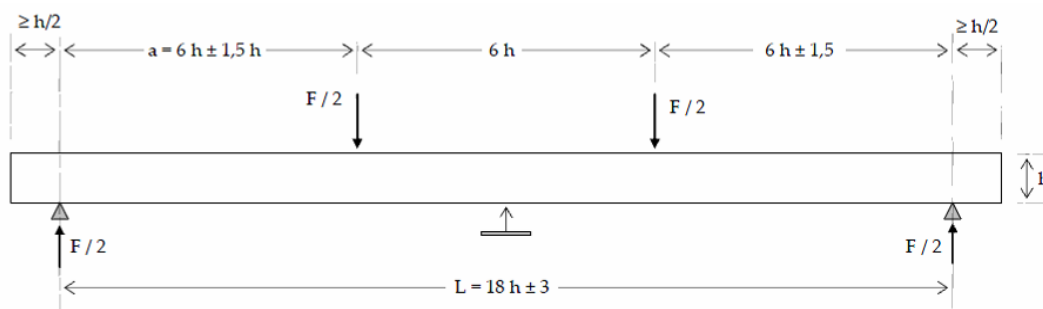


Figura 5.18. Esquema del ensayo de determinación del módulo de elasticidad global

La realización de este ensayo es prácticamente idéntica al anterior pero con la diferencia de que en el módulo de elasticidad global (E_{glo}), las deformaciones producidas se miden en el centro de la cara inferior de la probeta respecto a la luz total del ensayo, como se indica en la figura 5.18 y se miden con un único extensómetro colocado en la mitad del canto inferior, figuras 5.18 y 5.19.



Figura 5.19 disposición de los distintos elementos en el ensayo del módulo de elasticidad global

Para el cálculo del módulo de elasticidad global, se mantienen los criterios de determinación de F_1 y F_2 y se utiliza la siguiente expresión:

$$E_{glo} = \frac{l^3 \cdot (F_2 - F_1)}{b \cdot h^3 \cdot (w_2 - w_1)} \cdot \left[\left(\frac{3 \cdot a}{4 \cdot l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (\text{ec. 5.5})$$

Dónde:

a : es la distancia en mm entre el punto de apoyo y el punto más próximo de aplicación de la carga (en el ensayo: $a = 720$ mm);

l : es la longitud en mm entre los puntos de apoyo (en el ensayo $l_l = 2160$ mm);

$F_2 - F_1$: es el incremento de fuerza en N producido en el tramo de comportamiento elástico de la pieza sometida a flexión y que corresponde al tramo recto de la gráfica tensión / deformación de la figura 5.17;

$w_2 - w_1$: es el incremento de las deformaciones en mm, producidas en el tramo de cargas entre F_2 y F_1 ;

b : es el ancho medio de la sección de la pieza en mm;

h : es la altura media de la sección de la pieza en mm.

5.12.3. Tensión de rotura

El objetivo del último ensayo es poder determinar la tensión de rotura en flexión.

El cálculo de la resistencia a flexión o tensión de rotura (TDR), se basa en un ensayo con idéntica configuración al de determinación del módulo de elasticidad, véase figura 5.20. Normalmente, una vez acabado el ensayo de elasticidad, se retiran los extensómetros y se continúa aplicando carga hasta llegar a la rotura de la probeta.

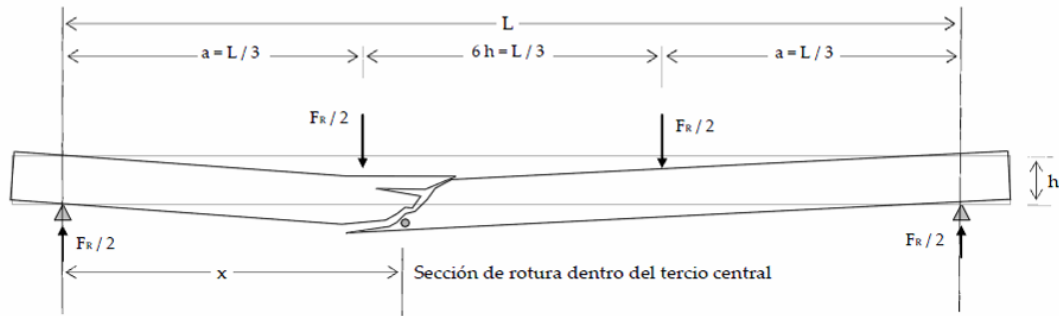


Figura 5.20. Esquema del ensayo de tensión de rotura

La tensión de rotura en N/mm^2 se calcula con la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F_R \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (\text{ec. 5.5})$$

Dónde:

F_R : es la carga de rotura en N;

a : es la distancia en mm entre el punto de apoyo y el punto más próximo de aplicación de la carga (en el ensayo: $a = 720$ mm);

b : es el ancho medio de la sección de la pieza en mm;

h : es la altura media de la sección de la pieza en mm.

Generalmente la rotura de la pieza se produce dentro del tercio central, entre los dos puntos de apoyo de las cargas, en la zona de momento flector máximo pero en algunas ocasiones la rotura se produce fuera de ese tercio central debido a la presencia de particularidades de la madera, como un gran nudo, que originan el fallo fuera del tercio central, figura 5.21.



Figura 5.21 Rotura de la probeta fuera del tercio central

En estos casos, la tensión real a la que se produce la rotura no es la correspondiente al momento máximo sino al momento que se produce en la sección de rotura, fuera del tercio central. Por lo tanto, la fórmula para el cálculo en estos casos será:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F_R}{b \cdot h^2} \cdot \left(\frac{l}{2} - y \right) \quad (\text{ec. 5.6})$$

Dónde:

F_R : es la carga de rotura en N;

l : es la longitud en mm del vano entre los apoyos (en el ensayo $l_l = 2160$ mm);

y : es la distancia en mm desde el centro de la pieza a su punto de rotura;

b : es el ancho medio de la pieza en mm;

h : es la altura media de la pieza en mm.

No obstante, para seguir una interpretación más fiel al texto de las normas UNE-EN 408 y UNE-EN 384, esta corrección no se ha considerado en los resultados que se han recogido.

CAPÍTULO 6:

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Introducción

A lo largo de este capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos en las diversas pruebas y las relaciones que se pueden establecer entre las propiedades mecánicas y las evaluaciones no destructivas con el fin de obtener las expresiones que permitan la estimación de las propiedades mecánicas.

6.2. Clasificación visual

Durante esta fase se realizó, en primer lugar, la clasificación visual de la muestra de acuerdo a la norma UNE 56544:2011 como madera de gran escuadría MEG. A continuación, dado que la dimensión de las piezas estudiadas estaba muy próxima a la frontera entre la pequeña y la gran escuadría, se procedió a clasificar la muestra como si se tratase de madera de pequeña escuadría. Esto permitió obtener una serie de conclusiones sobre el rendimiento de la clasificación y la idoneidad del valor de frontera en ambas clases

6.2.1 Rendimiento de la clasificación

En una primera fase se ha realizado la clasificación de las piezas de acuerdo con los criterios de la norma UNE 56544:2011 para la madera de gruesa escuadría. En esta norma y para la única calidad de gruesa escuadría (MEG), se especifican unas limitaciones para los defectos relacionados con la deformación de la pieza (curvatura de canto, de cara, alabeo y atejadura o abarquillado) que son más estrictas cuando la clase resistente que se pueda asignar a la combinación de especie y calidad sea mayor que C18. Este criterio viene obligado por la norma marco de las normas de clasificación en Europa, UNE-EN 14081-1:2006+A1. Por este motivo, en este trabajo se han mantenido ambas opciones de clasificación, según la clase resistente resultante sea mayor o no que la C18. Con el fin de diferenciar fácilmente ambas opciones se denominarán respectivamente ClaseVgeA y ClaseVgeB.

Lógicamente, no es posible decantarse por una de ambas en la muestra analizada, ya que para proceder a la asignación de la clase resistente se requieren conocer el resto de muestras estudiadas de la misma especie. En la tablas 6.1 y 6.2 se resumen los resultados del rendimiento, las propiedades mecánicas y densidad obtenidas para cada calidad y para ambas posibilidades de asignación de clase resistente.

	Número piezas - Porcentaje	Tensión de rotura a flexión (N/mm ²) $f_{m,mean}$ - CV $f_{m,k}$	Módulo de elasticidad (N/mm ²) E_{glo} - CV	Densidad (kg/m ³) ρ_{mean} - CV ρ_k
MEG	40 - 27 %	49,66 - 25 % 28,18	10.279 - 16 %	524 - 11 % 425
Rechazo	110 - 73 %	40,46 - 32 % 18,25	8.468 - 25 %	493 - 12 % 411
Total	150 - 100 %	42,95 - 31 % 18,67	8.952 - 24 %	501 - 12 % 415
$f_{m,mean}$	Valor medio de la resistencia a flexión			
CV	Coeficiente de variación			
$f_{m,k}$	Valor característico (5º percentil) de la resistencia a flexión			
E_{glo}	Valor medio del módulo de elasticidad global referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010			
ρ_{mean}	Valor medio de la densidad referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010			
ρ_k	Valor característico (5º percentil) de la densidad referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010			

Tabla 6.1. Rendimiento de clasificación según UNE 56544 - MEG y propiedades físico-mecánicas para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).

	Número piezas - Porcentaje	Tensión de rotura a flexión (N/mm ²) $f_{m,mean}$ - CV $f_{m,k}$	Módulo de elasticidad (N/mm ²) E_{glo} - CV	Densidad (kg/m ³) ρ_{mean} - CV ρ_k
MEG	79 - 53 %	48,82 - 26 % 28,85	9.921 - 21 %	526 - 10 % 448
Rechazo	71 - 47 %	36,40 - 31 % 18,05	7.871 - 19 %	474 - 11 % 406
Total	150 - 100 %	42,95 - 31 % 18,67	8.952 - 24 %	501 - 12 % 415
$f_{m,mean}$	Valor medio de la resistencia a flexión			
CV	Coeficiente de variación			
$f_{m,k}$	Valor característico (5º percentil) de la resistencia a flexión			
E_{glo}	Valor medio del módulo de elasticidad global referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010			
ρ_{mean}	Valor medio de la densidad referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010			
ρ_k	Valor característico (5º percentil) de la densidad referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010			

Tabla 6.2. Rendimiento de clasificación según UNE 56544 - MEG y propiedades físico-mecánicas para clase resistente C18 o inferior (ClaseVgeB).

El porcentaje de rechazo de la clasificación es del 73 % para $CR > C18$ y del 47 % para $CR \leq C18$ (CR = Clase Resistente). Ya el porcentaje de rechazos del 47 % resulta demasiado elevado para su aceptación en la práctica.

En el análisis de varianza de las variables estudiadas (TDR: tensión de rotura, E_{glo12} : módulo de elasticidad y $DenReb12$: densidad local) se observa que el P-Valor es menor que 0,05 y por tanto existen diferencias estadísticamente significativas entre la calidad MEG y el rechazo, tanto para la ClaseVgeA como para la ClaseVgeB. A modo de ejemplo, en las figuras 6.1 y 6.2 se incluyen las gráficas de medias para la tensión de rotura.

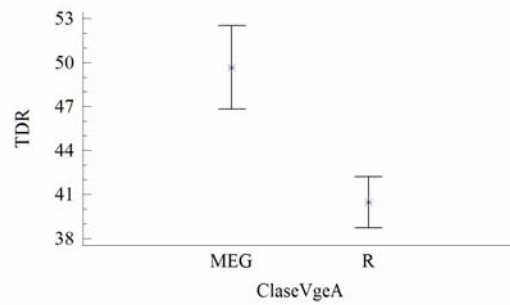


Figura 6.1. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura a flexión, en N/mm^2 para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).

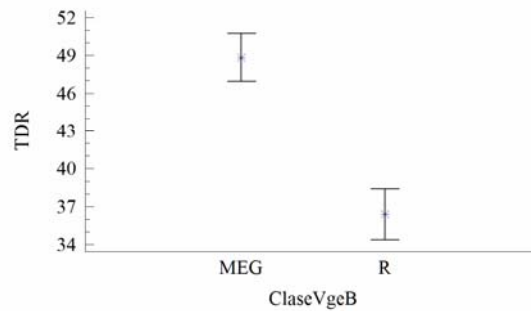


Figura 6.2. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura a flexión, en N/mm^2 para clase resistente menor o igual que C18 (ClaseVgeB).

En la diagnóstico del análisis de varianza se deben comprobar la normalidad, la homocedasticidad y la independencia. Estos requisitos se cumplen para el caso estudiado. Gráficamente y a modo de ejemplo para la tensión de rotura en la ClaseVgeA puede verificarse el cumplimiento de la normalidad, figura 6.3, la homocedasticidad, figuras 6.4 y 6.5 y la independencia, figura 6.6.

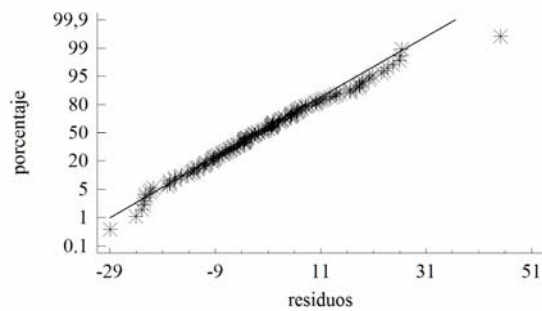


Figura 6.3. Gráfico de residuos vs porcentaje del ANOVA (normalidad). Tensión de rotura a flexión, en N/mm^2 para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).

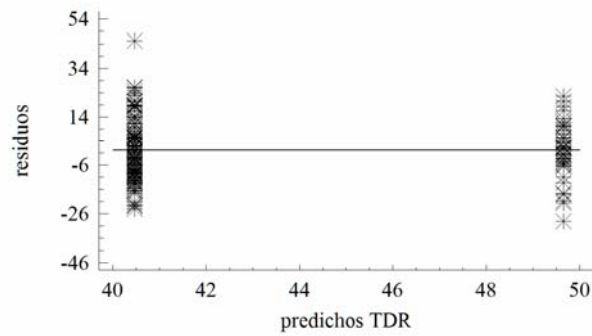


Figura 6.4. Gráfico de valores predichos vs residuos del ANOVA (homocedasticidad). Tensión de rotura a flexión, en N/mm^2 para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).

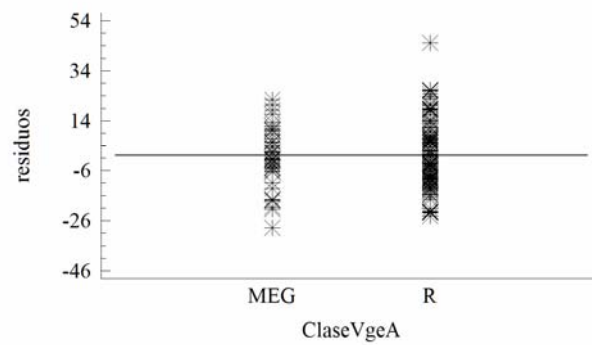


Figura 6.5. Gráfico de residuos vs porcentaje del ANOVA (homocedasticidad). Tensión de rotura a flexión, en N/mm^2 para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).

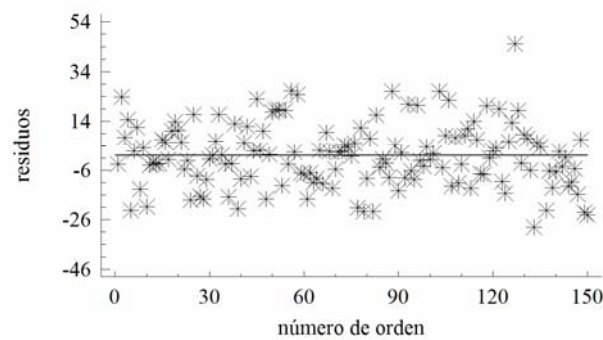


Figura 6.6. Gráfico de residuos vs número de orden del ANOVA (linealidad). Tensión de rotura a flexión, en N/mm^2 para clase resistente mayor que C18 (ClaseVgeA).

	Número piezas - Porcentaje	Tensión de rotura a flexión (N/mm ²) f _{m,mean} - CV f _{m,k}	Módulo de elasticidad (N/mm ²) E _{glo} - CV	Densidad (kg/m ³) ρ _{mean} - CV ρ _k
ME-1	4 - 3 %	55,68 - 20 % (1)	9.673 - 10 %	520 - 7 % (2)
ME-2	63 - 42 %	49,18 - 26 % 28,29	10.102 - 21 %	530 - 10 % 449
Rechazo	83 - 55 %	37,47 - 31 % 18,31	8.020 - 20 %	478 - 11 % 409

(1) Mínimo 46,17
(2) Mínimo 467

f_{m,mean} Valor medio de la resistencia a flexión
CV Coeficiente de variación
f_{m,k} Valor característico (5º percentil) de la resistencia a flexión
E_{glo} Valor medio del módulo de elasticidad global referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010
ρ_{mean} Valor medio de la densidad referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010
ρ_k Valor característico (5º percentil) de la densidad referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010

Tabla 6.3. Rendimiento de clasificación según UNE 56544 – ME-1 y ME-2 y propiedades físico-mecánicas.

En la tabla 6.3 se muestra el resultado de clasificar las piezas como si se tratara de piezas de pequeña escuadría (grosso inferior o igual a 70 mm). Esto permite analizar los resultados en la frontera entre las piezas de gran y pequeña escuadría.

Se observa que el porcentaje de rechazo es mayor que el de la tabla 6.2 (para CR ≤ C18) y menor que el de la tabla 6.1 (CR > C18). La presencia de la calidad ME-1 es tan solo del 3 % lo que implica que no compensa diferenciar dos calidades (ME-1 y ME-2). Existen diferencias estadísticamente significativas entre la calidad ME-2 y el rechazo; sólo hay 4 piezas asignadas a la calidad ME-1, por lo que no es posible apreciar diferencias con la calidad ME-2. En la figura 6.7 se incluye el gráfico de medias del análisis de varianza para el caso de la tensión de rotura.

El límite que se establece en la norma española de clasificación entre la pequeña y gran escuadría, con un grosso de 70 mm, tiene su origen en el hecho de que las propiedades mecánicas de las especies españolas habían sido obtenidas, hasta aproximadamente el año 2003, a partir de ensayos sobre piezas con un grosso menor o igual a los 70 mm. Por tanto, no procedía extender las propiedades mecánicas deducidas en escuadrías pequeñas a grandes. A partir de los años 2004 a 2007, se realizaron en España ensayos de piezas de escuadrías grandes

(con anchos de 100 a 200 mm), en gran parte debido a que los aserraderos que producían madera estructural lo hacían en escuadrías grandes.

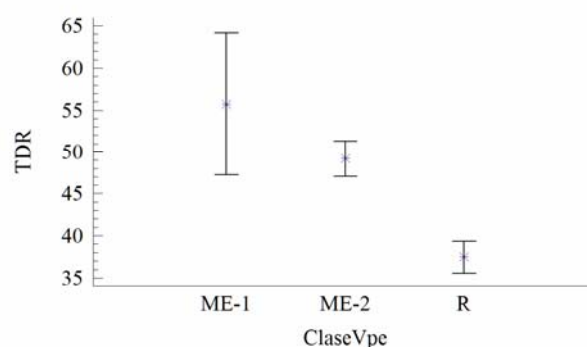


Figura 6.7. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura en N/mm^2 . Clasificación como pequeña escuadría.

Por este motivo, en la versión de 2007 de la norma UNE 56544 aparece de manera específica la categoría de madera estructural de gran escuadría. Esta nueva categoría establece una única calidad MEG, con especificaciones adecuadas a las piezas de gran sección, buscando además, un rendimiento elevado.

En los resultados mostrados aquí sobre la clasificación de la madera según los criterios de pequeña y gruesa escuadría se puede concluir que es más adecuado el criterio establecido en la norma UNE de clasificar la madera de gran escuadría en un única calidad MEG frente a las dos posibles calidades de la pequeña escuadría (ME-1 y ME-2). Como puede observarse el rendimiento de la ME-2 es peor que el de la MEG (para $CR > C18$) y sus propiedades mecánicas son prácticamente las mismas.

6.2.2 Análisis de las causas de rechazo de las piezas

A partir de este momento las consideraciones se hacen para la clasificación de la madera como de gran escuadría (aplicando el criterio establecido en la norma para la calidad MEG)

En las figuras 6.8 y 6.9 se recoge el porcentaje de piezas que son rechazadas por cada tipo de singularidad de la madera, para una asignación superior a C18 o menor o igual a C18, respectivamente. Se observa que el parámetro de rechazo más relevante es el de alabeo, que implica un 64 y un 39 % de rechazo, respectivamente. La norma UNE-EN 14081-1:205+A1:2011 en su apartado 5.2.2 sobre las deformaciones dice en la nota 1 que incluso en el caso de que la deformación no influya directamente en la resistencia es muy recomendable que la madera para la construcción tenga alguna limitación de las deformaciones. En versiones anteriores de esta norma se decía que esta singularidad podría llegar a aceptarse siempre que la

colocación en obra permita su corrección. Se puede observar, por tanto que se trata de un defecto de relativa importancia.

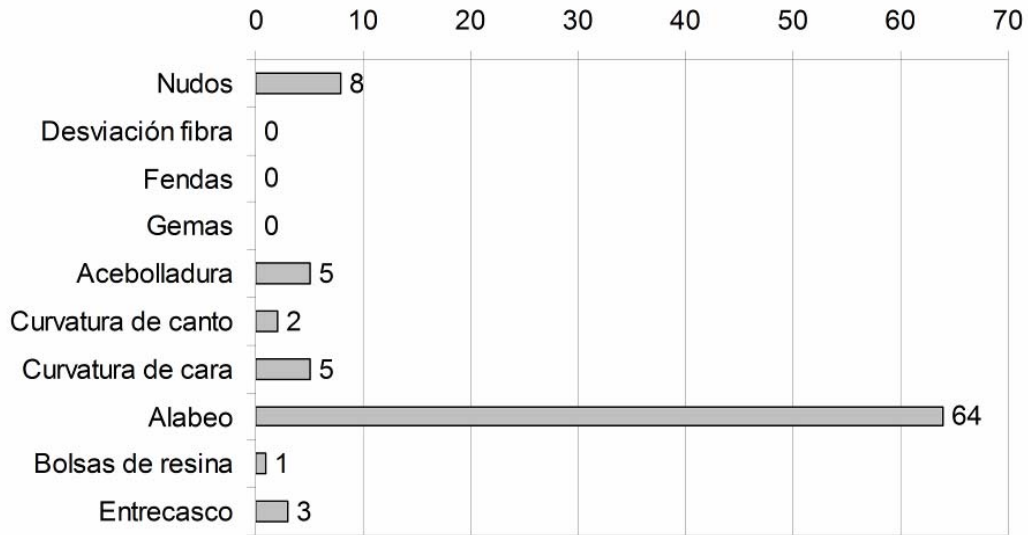


Figura 6.8 Porcentaje de piezas rechazadas por cada defecto para la calidad MEG, cuando la clase resistente a asignar fuera superior a C18 (Clase VgeA).

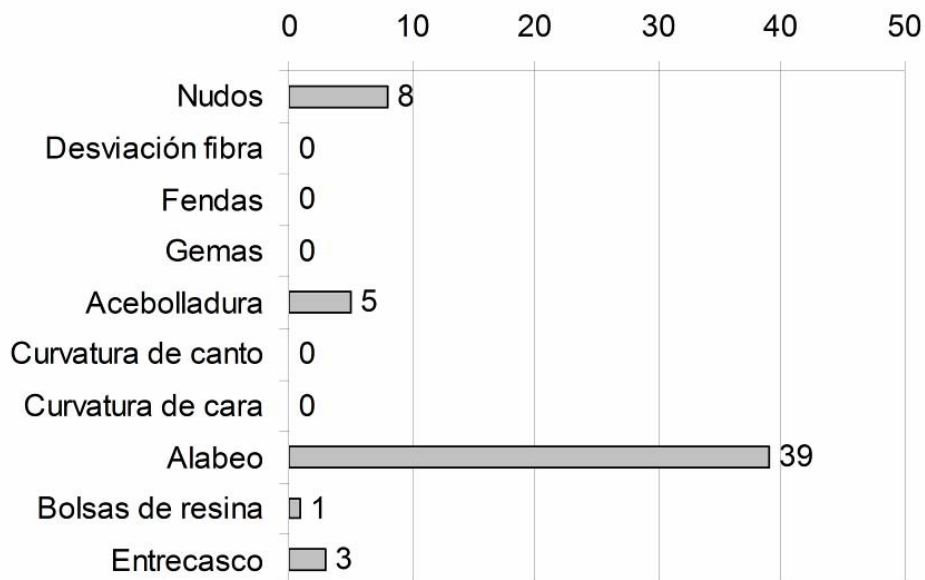


Figura 6.9 Porcentaje de piezas rechazadas por cada defecto para la calidad MEG, cuando la clase resistente a asignar fuera menor o igual a C18 (Clase VgeB).

La penalización del rendimiento de la madera como consecuencia del defecto del alabeo es tan elevada que en la práctica anularía las posibilidades de uso estructural de esta especie. Por esta razón se procede a analizar los resultados en el supuesto de no considerar en la clasificación el defecto del alabeo.

En las tablas 6.4 y 6.5 se recogen los resultados del rendimiento y propiedades físico-mecánicas en el caso de no considerar el parámetro del alabeo en la clasificación visual. Se puede apreciar una disminución del rechazo del 73 y 47 % al 23 y 17 %, respectivamente para clase resistente superior a C18 o menor o igual a C18; el valor característico de la resistencia a flexión desciende aproximadamente de 28 a 22 N/mm², pérdida relevante pero compensada con el aumento de rendimiento; sin embargo, el módulo de elasticidad solo desciende de 10.279 y 9.921 a 9.275 y 9.137 N/mm².

	Número piezas - Porcentaje	Tensión de rotura a flexión (N/mm ²) $f_{m,mean}$ - CV $f_{m,k}$	Módulo de elasticidad (N/mm ²) E_{glo} - CV	Densidad (kg/m ³) ρ_{mean} - CV ρ_k
MEG (*)	116 - 77 %	44,59 - 31 % 22,20	9.275 - 23 %	501 - 12 % 413
Rechazo	34 - 23 %	37,43 - 30 % 18,02	7.844 - 23 %	502 - 10 % 425
$f_{m,mean}$	Valor medio de la resistencia a flexión			
CV	Coeficiente de variación			
$f_{m,k}$	Valor característico (5° percentil) de la resistencia a flexión			
E_{glo}	Valor medio del módulo de elasticidad global referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010			
ρ_{mean}	Valor medio de la densidad referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010			
ρ_k	Valor característico (5° percentil) de la densidad referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010			

Tabla 6.4. Rendimiento de clasificación y propiedades físico-mecánicas según para la calidad MEG (*) de la norma UNE 56544 sin considerar el parámetro de alabeo y para clase resistente mayor que C18 (Clase VgeA).

	Número piezas - Porcentaje	Tensión de rotura a flexión (N/mm ²) $f_{m,mean}$ - CV $f_{m,k}$	Módulo de elasticidad (N/mm ²) E_{glo} - CV	Densidad (kg/m ³) ρ_{mean} - CV ρ_k
MEG (*)	118 - 83 %	44,49 - 30 % 22,98	9.137 - 24 %	502 - 12 % 415
Rechazo	25 - 17 %	35,34 - 32 % 17,68	8.012 - 22 %	496 - 11 % 419

$f_{m,mean}$	Valor medio de la resistencia a flexión
CV	Coefficiente de variación
$f_{m,k}$	Valor característico (5º percentil) de la resistencia a flexión
E_{glo}	Valor medio del módulo de elasticidad global referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010
ρ_{mean}	Valor medio de la densidad referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010
ρ_k	Valor característico (5º percentil) de la densidad referido al 12% de humedad de acuerdo a lo indicado por la norma UNE-EN 384:2010

Tabla 6.5. Rendimiento de clasificación y propiedades físico-mecánicas según para la calidad MEG (*) de la norma UNE 56544 sin considerar el parámetro de alabeo y para clase resistente menor o igual que C18 (ClaseVgeB).

Del análisis de varianza para las variables estudiadas se puede deducir que existen diferencias estadísticamente significativas entre la calidad MEG y el rechazo, aún en el caso de no considerar el defecto del alabeo en la clasificación, con la excepción de la variable densidad. En las figuras 6.10 y 6.11 se muestran los gráficos de medias del análisis de varianza para la tensión de rotura para ambos grupos (clase resistente superior o menor o igual a C18).

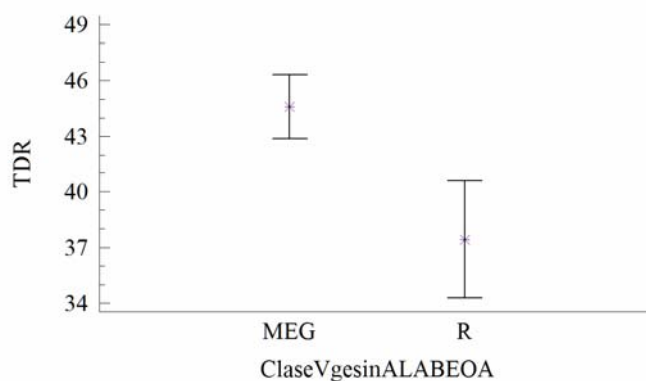


Figura 6.10. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura en flexión en N/mm². Calidades visuales sin tener en cuenta el alabeo para clase resistente superior a C18.

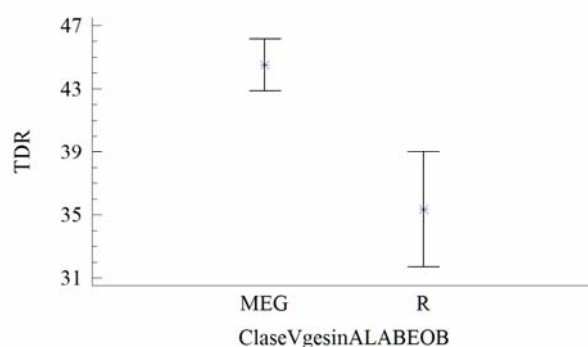


Figura 6.11. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura en flexión en N/mm^2 . Calidades visuales sin tener en cuenta el alabeo para clase resistente menor o igual a C18.

6.2.3 Parámetros comunes en piezas con alabeo

Tras analizar las piezas rechazadas por alabeo se llegó a la conclusión que en estas piezas el parámetro más frecuente es la presencia de médula. De las 47 piezas que contienen la médula, 33 (70 %) presentaban alabeo. La presencia de médula está relacionada con el espesor medio de los primeros cinco anillos, de manera que cuanto mayor sea el espesor medio de anillo más cerca estará la médula. La variable del espesor del anillo es normal.

El análisis de varianza de la variable del espesor del anillo muestra diferencia entre sus valores medios, aunque el test de contraste no es concluyente al 95 % de nivel de confianza. En las figuras 6.12 y 6.13 se muestra el gráfico de medias del análisis de varianza para el espesor medio del anillo para los grupos de piezas que son aceptadas como MEG(A o B) o Rechazadas, exclusivamente por la especificación del alabeo. El espesor medio del anillo es de 7,85 y 8,74 mm para la calidad MEG y el rechazo, respectivamente en el caso de Clase A; y de 7,90 y 9,24 mm para el caso de Clase B.

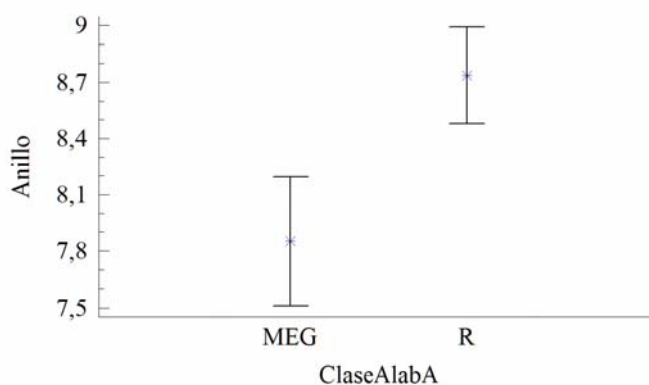


Figura 6.12. Gráfico de medias del ANOVA. Espesor medio del anillo en mm. Calidades visuales atendiendo únicamente al criterio de alabeo para clase resistente superior a C18 (Clase A).

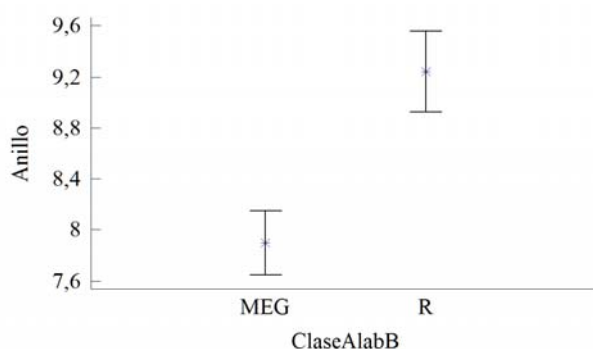


Figura 6.13. Gráfico de medias del ANOVA. Espesor medio del anillo en mm. Calidades visuales atendiendo únicamente al criterio de alabeo para clase resistente menor o igual a C18(Clase B).

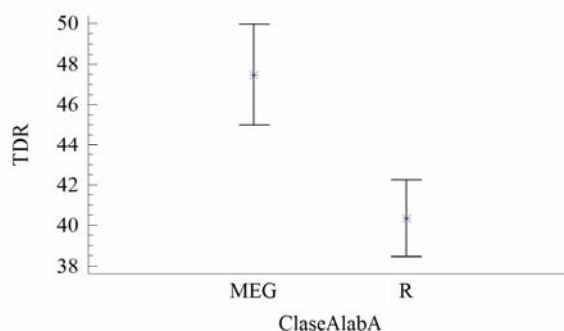


Figura 6.14. Gráfico de medias del ANOVA. Tensión de rotura a flexión en N/mm^2 . Calidades visuales atendiendo únicamente al criterio de alabeo para clase resistente superior a C18.

Por tanto ambos grupos pueden considerarse que tienen diferente espesor medio del anillo y que este hecho tiene relación con el alabeo de la pieza. En el análisis de varianza de las variables de tensión de rotura, módulo de elasticidad y densidad, se observa que existen diferencias entre las piezas rechazadas o no por el criterio del alabeo exclusivamente, aunque no son estadísticamente significativas al 95 % de nivel de confianza. En la figura 6.14 se muestra el gráfico de medias para la variable de la tensión de rotura para el caso de asignación de clase resistente superior a C18; el resultado es similar para la asignación de una clase resistente menor o igual a C18.

6.2.4 Conclusiones

Las propiedades mecánicas y la densidad de la muestra de 150 piezas de madera de pino radiata clasificadas como MEG según la norma UNE 56544, procedente de Cataluña presentan un valor característico de la resistencia a flexión de $28,18 N/mm^2$, un valor medio del módulo de elasticidad de $10.279 N/mm^2$ y un valor característico de la densidad de $425 kg/m^3$. El

porcentaje de rechazo es muy elevado (73 % en caso de una asignación de clase resistente superior a C18).

Si la clase resistente asignada fuera menor o igual que la C18, las especificaciones de la norma de clasificación UNE 56544:2011 son más relajadas, y se obtendría un valor característico de la resistencia a flexión de 28,85 N/mm², un valor medio del módulo de elasticidad de 9.921 N/mm² y un valor característico de la densidad de 448 kg/m³. De manera contraria a lo esperado, la resistencia a flexión y la densidad son ligeramente superiores y el módulo de elasticidad sólo desciende un 4 %. Sin embargo el porcentaje de rechazo baja a un 47 %.

La clasificación de las piezas de sección 80x120 mm (gruesa escuadría) consideradas como de pequeña escuadría da lugar a una asignación de propiedades mecánicas similares para la calidad ME-2, con un rendimiento prácticamente nulo para la madera de calidad ME-1. El porcentaje de rechazo es más elevado que en el caso anterior (55 %). Esto implica que no es rentable su clasificación como madera de pequeña escuadría y que la asignación a MEG es más adecuada.

El defecto más relevante en el rechazo de las piezas que no alcanzan la calidad MEG es el alabeo de la sección. Si no se considera este defecto, se observa que la resistencia característica a flexión desciende a 22 N/mm², mientras que el valor medio del módulo de elasticidad solo disminuye a 9.275 N/mm². La densidad característica baja a 413 kg/m³. La principal ventaja de no tener en cuenta el defecto del alabeo es que el porcentaje de rechazo desciende al 23 %.

La causa de la disminución de las propiedades mecánicas, al admitir el alabeo, está relacionada con la presencia de médula y seguramente de madera juvenil.

6.3 Estimación de la densidad

6.3.1 Introducción. Densidad global y local

La determinación de la densidad, tal y como se indica en el apartado 5.3.2. del capítulo 5º se determinó mediante dos procesos diferentes. En el primer proceso se obtuvo la densidad de la pieza completa a la que se denominó “densidad global” (mediante pesada en balanza) y en el segundo proceso se obtuvo la densidad de una rebanada de 15 cm de longitud obtenida después del ensayo de rotura, a la que se denominó “densidad local”.

En la tabla 6.6 se muestran los valores de la densidad local y global.

Densidad			
local		global	
valor medio (kg/m ³)	CV (%)	valor medio (kg/m ³)	CV (%)
501	11,6	515	11,1

Tabla 6.6. Valor medio y coeficiente de variación de la densidad local y global

La densidad se obtuvo de acuerdo a la metodología descrita en el capítulo 5. Las distribuciones de las densidades local y global son normales; el test de Chi-cuadrado presenta P-valores superiores a 0,05. En las figuras 6.15 y 6.16 se muestran los histogramas de frecuencias para ambas variables.

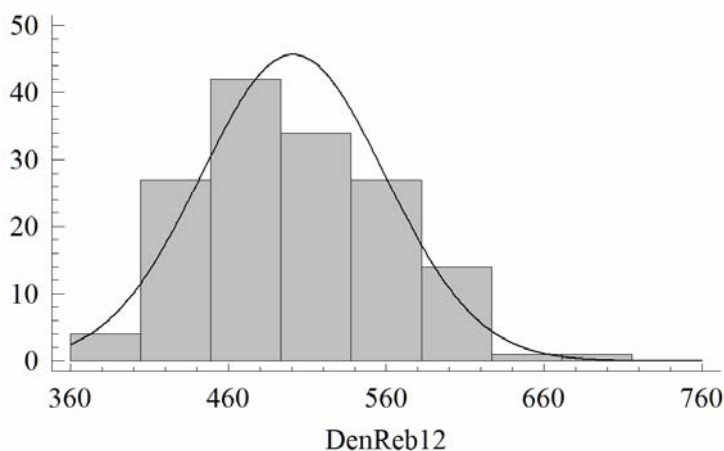


Figura 6.15 Histograma de frecuencias de la densidad local (kg/m³) al 12%

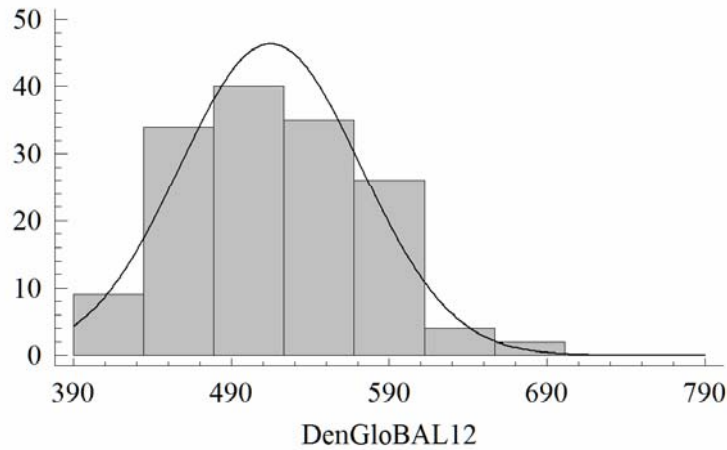


Figura 6.16 Histograma de frecuencias de la densidad global (kg/m^3) al 12%

Cuando se comparan los valores obtenidos a partir de la pieza entera y de la rebanada se llega a la conclusión de que las diferencias entre los valores son bajas ($< 2,8\%$), con una relación lineal con un intervalo de confianza del 99 % que se puede expresar con la siguiente ecuación, figura 6.17:

$$\text{Den}_{\text{glo}} = 45,6272 + 0,936287 \cdot \text{Den}_{\text{loc}} \quad R^2 : 0,90$$

donde:

Den_{glo} : densidad de la pieza entera con un contenido de humedad del 12%, en kg/m^3 ;

Den_{loc} : densidad de la rebanada con un contenido de humedad del 12%, en kg/m^3 .

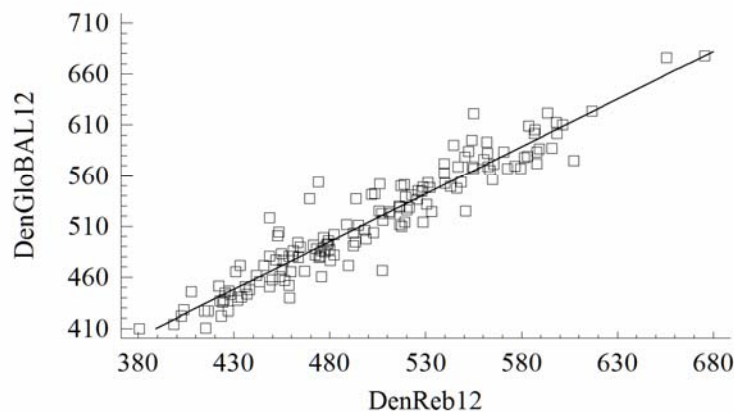


Figura 6.17 Recta de regresión entre la densidad local y la global

La diagnóstico de la regresión lineal simple exige la verificación de las condiciones de normalidad, figura 6.18, linealidad y homocedasticidad, figura 6.19 e independencia, figura 6.20.

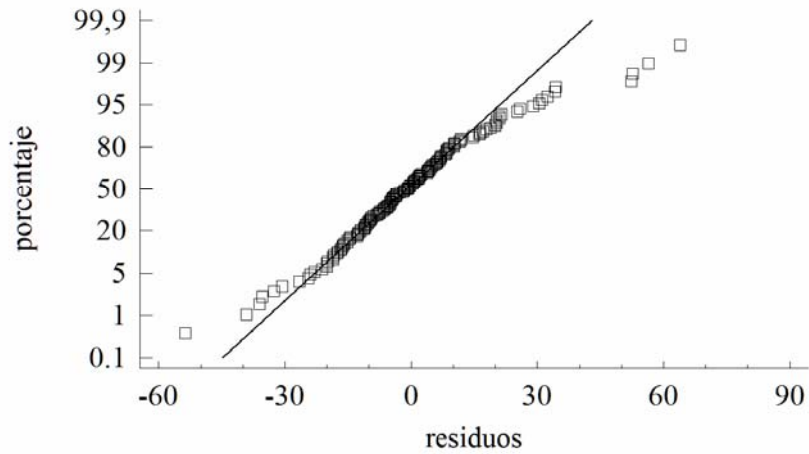


Figura 6.18 Gráfico de residuos vs porcentaje de la regresión lineal (normalidad).

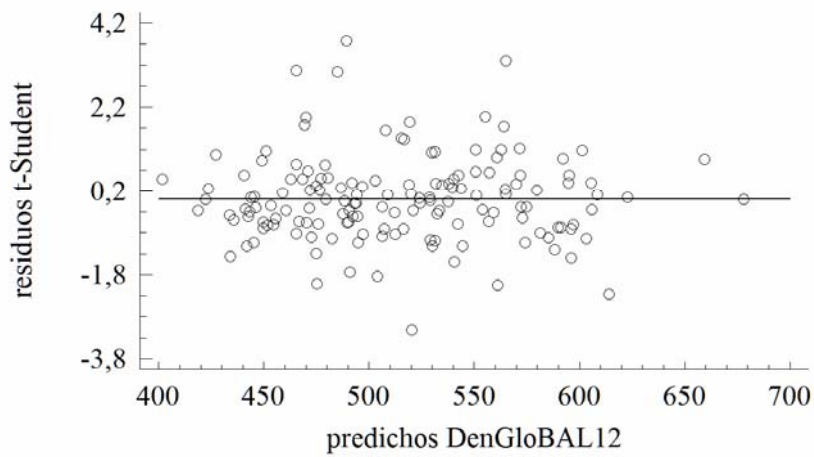


Figura 6.19 Gráfico de valores predichos vs residuos t-Student de la regresión lineal (linealidad y homocedasticidad).

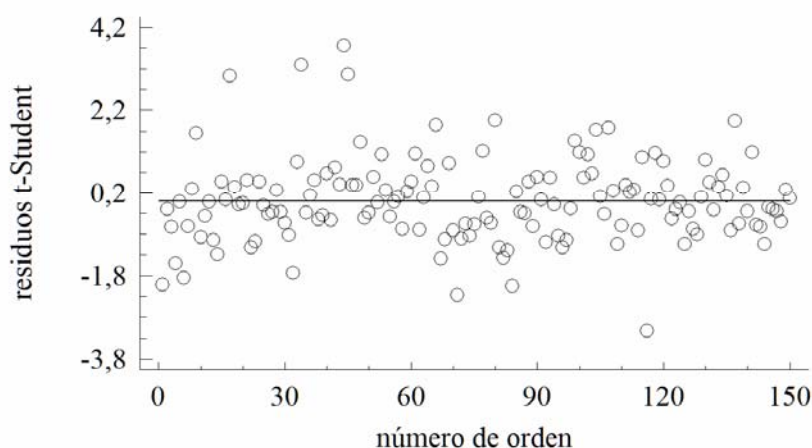


Figura 6.20 Gráfico de número de orden vs residuos t-Student de la regresión lineal (independencia).

Una vez obtenidos los resultados se llega a la conclusión de que la obtención de la densidad global se acerca mucho a los valores obtenidos con la metodología que propone la UNE-EN: 408:2011 a partir de una rebanada extraída de la pieza completa tras el ensayo de rotura.

La densidad es un parámetro importante para caracterizar el material, así como para deducir mediante ensayos no destructivos otras variables importantes como el módulo de elasticidad dinámico.

La determinación de la densidad en el laboratorio no presenta apenas problemas pero en cambio cuando se desea obtener la densidad de elementos de madera ya colocados en obra el proceso presenta grandes dificultades.

Entre los objetivos de esta tesis está el de la determinación de las propiedades de la madera en obra existente por lo que la obtención de la densidad de la madera “in situ” es una parte esencial de la misma. Con este fin en este trabajo se proponen tres métodos de evaluación no destructiva (o ligeramente destructiva) para la estimación de la densidad. El primero consiste en la extracción de probetas testigo de pequeñas dimensiones, que puede considerarse un ensayo ligeramente destructivo (MDT, Minor Damage Testing). Los dos siguientes son no destructivos y ya han sido empleados por varios autores (Íñiguez 2007), como son la fuerza de arranque de tornillo y la profundidad de penetración.

6.3.2 Probetas testigo

La extracción de probetas testigo puede considerarse como un método ligeramente destructivo ya que deja un orificio de forma cilíndrica en la pieza. En la tabla 6.7 se pueden observar los valores medios y los coeficientes de variación de la densidad obtenida en probetas extraídas desde el canto de la pieza o la cara (dimensión de la sección transversal menor y mayor, respectivamente) y el valor medio de ambos. Generalmente, en la muestra estudiada, la primera, extraída desde el canto suele tener una dirección predominantemente tangencial, y la segunda extraída desde la cara, una dirección predominantemente radial. Se realizaron 2 extracciones por pieza en un total de 60 piezas.

Densidad en testigos					
Desde el canto (b)		Desde la cara (h)		Media	
valor medio (kg/m ³)	CV (%)	valor medio (kg/m ³)	CV (%)	valor medio (kg/m ³)	CV (%)
518	12,7	512	13,5	515	12,6

Tabla 6.7. Valor medio y coeficiente de variación de la densidad obtenida mediante testigos

La variable de densidad obtenida en la medición desde la cara (h) presenta una distribución normal, figura 6.21, mientras que la obtenida con la medición desde el canto (b) se aleja de la normalidad, figura 6.22.

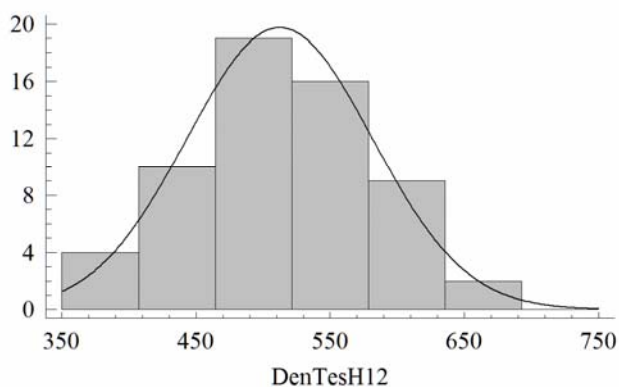


Figura 6.21 Histograma de frecuencias de la densidad obtenida con la medición en la cara, en kg/m³

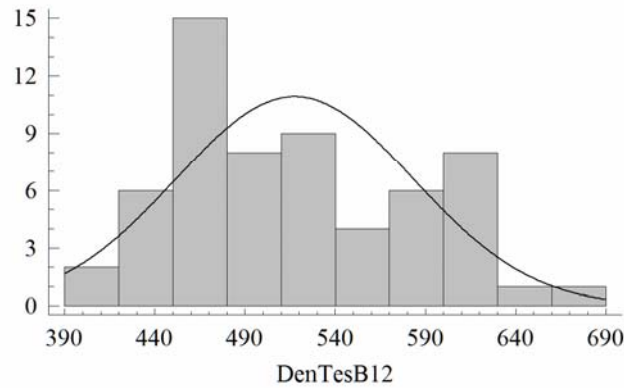


Figura 6.22 Histograma de frecuencias de la densidad obtenida con la medición en el canto, en kg/m^3

De los resultados de la tabla 6.7 y de la comparación entre medias de ambas variables se deduce que no influye la dirección de extracción (canto o cara) en el valor obtenido de la densidad. Debido a ello se utilizará el valor de la media aritmética de ambos valores, canto y cara como parámetro estimador de la densidad. Además, como se verá después, la regresión lineal de la media presenta una mayor correlación con la densidad local, que cuando se realiza la regresión con una sólo de las dos direcciones.

Mediante una regresión lineal entre la densidad de la rebanada y la densidad del testigo se obtiene la siguiente expresión:

$$\text{Den}_{\text{loc}} = 53,6357 + 0,850184 \cdot \text{Den}_{\text{test}}$$

con un intervalo de confianza del 99% y con una R^2 : 0,88

donde:

Den_{loc} : es la densidad de la rebanada al 12% de humedad en kg/m^3

Den_{test} : es la densidad del testigo en kg/m^3 (usando la el valor de la media aritmética de las lecturas en canto y cara) al 12% de humedad

6.3.3 Arranque de tornillo

En el ensayo de la resistencia al arranque de tornillo se utiliza la variable resistencia como estimador de la densidad de la madera.

En la tabla 6.8 se recogen los valores medios y los coeficientes de variación de la fuerza de arranque en dirección radial, tangencial y el valor medio.

Fuerza de extracción					
radial		tangencial		media	
valor medio (kN)	CV (%)	valor medio (kN)	CV (%)	valor medio (kN)	CV (%)
2,10	20,9	2,06	23,4	2,08	19,6

Tabla 6.8. Valor medio y coeficiente de variación de la fuerza de extracción

La propiedad de la variable fuerza de extracción en ambas direcciones y el valor medio da lugar a histogramas normales. En la figura 6.26 se recoge el caso del valor medio de la fuerza de arranque entre la dirección radial y tangencial.

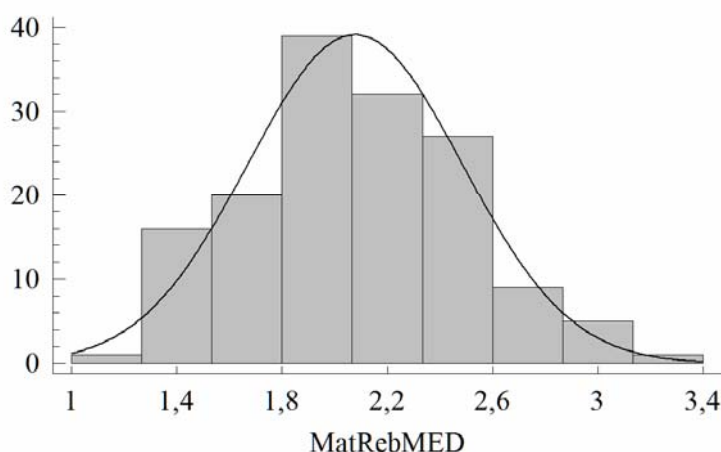


Figura 6.23 Histograma de frecuencias del valor medio de la fuerza de extracción entre la dirección tangencial y radial

De los resultados de la tabla 6.8 y de la comparación de medias se deduce que no influye la dirección de extracción (radial o tangencial) en el valor obtenido de la resistencia. Debido a ello en adelante, se utilizará como parámetro estimador de la densidad, el valor de la media aritmética de ambos valores (radial y tangencial).

Mediante una regresión lineal entre la densidad de la rebanada y la fuerza de extracción obtenemos la siguiente expresión:

$$\text{Den}_{\text{loc}} = 285,40 + 103,77 \cdot F_{\text{med}}$$

con un intervalo de confianza del 99% y con una R^2 : 0,53

donde:

Den_{loc} : es la densidad de la rebanada al 12% de humedad en kg/m^3

F_{med} : es la fuerza de extracción en kN (usando la el valor de la media aritmética de las lecturas radial y tangencial)

Cumple las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia en el análisis.

6.3.4 Penetrómetro

Entre las técnicas no destructivas está la de la medición de la profundidad de penetración de un penetrómetro, en nuestro caso el Pilodyn 6J. Esta técnica se utilizó inicialmente para determinar la profundidad de pudrición en postes así como la profundidad de los daños producidos en los árboles en pie por distintos tipos de ataques bióticos.

En este trabajo se ha empleado esta técnica para la determinación, de forma indirecta, de la densidad de la madera, relacionando la profundidad de penetración de la punta con la densidad de la especie estudiada.

En la tabla 6.9 se resumen las profundidades de penetración obtenidas para las direcciones radial y tangencial (y también para el valor medio de cada pareja).

Profundidad de penetración					
Radial		Tangencial		Media	
valor medio (mm)	CV (%)	valor medio (mm)	CV (%)	valor medio (mm)	CV (%)
12,20	15,8	12,83	20,8	12,51	16,2

Tabla 6.9. Valor medio y coeficiente de variación de la profundidad de penetración con Pilodyn 6J

Las distribuciones que se obtienen para las mediciones radial y tangencial son muy similares y en la práctica en madera en obra es difícil saber si la medida se realiza en una determinada dirección. Por estas razones se utilizará, en adelante, el valor medio de ambas lecturas.

En la figura 6.24 se incluye el histograma de frecuencias de la profundidad media de penetración que muestra una distribución aparentemente cercana a la normalidad, pero el test del Chi-cuadrado no permite verificar su normalidad.

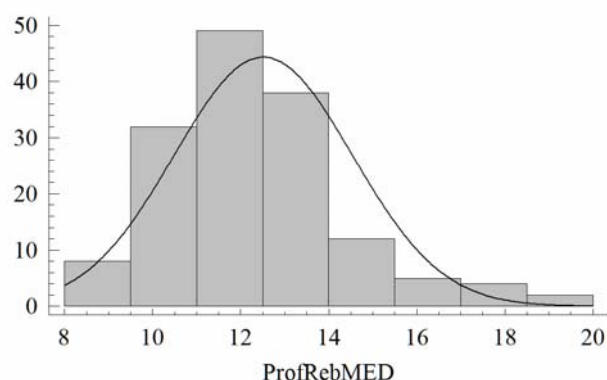


Figura 6.24 Histograma de frecuencias de la profundidad de penetración media en mm

Para poder estimar la densidad a partir de la profundidad de penetración se propone una regresión lineal entre la densidad y la profundidad de penetración.

$$\text{Den}_{\text{loc}} = 700,193 - 15,9204 \cdot \text{Prof}_{\text{med}} \quad R^2: 0,31$$

donde:

Den_{loc} : es la densidad de rebanada en kg/m^3 al 12% de humedad

Prof_{med} : es la profundidad de penetración en mm (media aritmética de de la penetración radial y tangencial).

Como se puede observar el coeficiente de determinación en la estimación de la densidad obtenido con la media aritmética de los valores de las lecturas radial y tangencial de penetración es $R^2: 0,31$.

Analizando lo que sucede si la estimación se realiza con uno solo de los valores de extracción; radial o tangencial, se obtiene, con un intervalo de confianza del 0,99 lo siguiente:

$$\text{Den}_{\text{loc}} = 700,584 - 16,8532 \cdot \text{Prof}_{\text{rad}} \quad R^2 : 0,31$$

$$\text{Den}_{\text{loc}} = 622,592 - 9,48155 \cdot \text{Prof}_{\text{tan}} \quad R^2 : 0,19$$

donde:

Den_{loc} : es la densidad de rebanada en kg/m^3 al 12% de humedad

Prof_{rad} : es la profundidad de penetración en mm en dirección radial

Prof_{tan} : es la profundidad de penetración en mm en dirección tangencial

Se observa una predicción más pobre en el caso de la dirección tangencial, donde el coeficiente de determinación baja de 0,31 a 0,19.

6.4. Módulo de elasticidad

6.4.1. Módulo de elasticidad global

Se realizó el ensayo mecánico de flexión, de acuerdo a la norma UNE-EN 408:2011, obteniendo el módulo de elasticidad de la madera aserrada estructural mediante la metodología descrita en el apartado 5.12.2.

En la tabla 6.10 se exponen los resultados de ensayo para la muestra de estudio.

Módulo de elasticidad global	
valor medio (N/mm ²)	CV (%)
8.952	23,7

Tabla 6.10 Valor medio y coeficiente de variación del módulo de elasticidad global al 12% de humedad

La figura 6.25 representa el histograma de frecuencias de la variable “módulo de elasticidad global” para la muestra. La distribución se aleja ligeramente de una distribución normal.

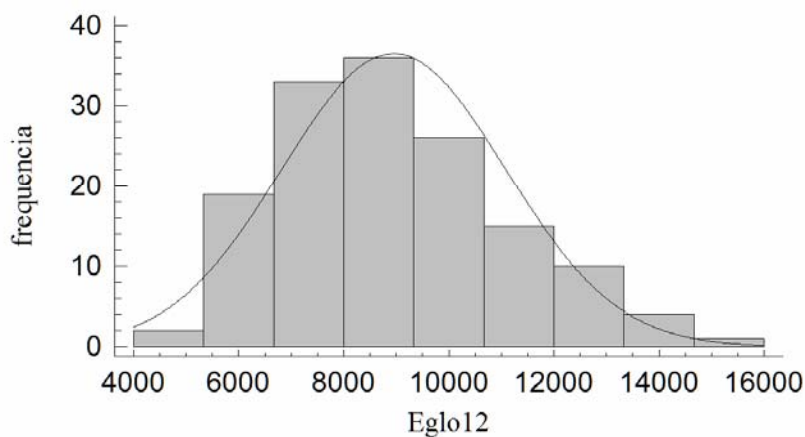


Figura 6.25 Histograma de frecuencias del módulo de elasticidad global al 12 % de humedad de la muestra

6.4.2. Módulo de elasticidad local

Para el cálculo del módulo de elasticidad local se procedió de acuerdo a la UNE-EN 408:2011 tal y como se explica en el apartado 5.12.1. El ensayo se realizó en 37 piezas. En estas probetas se midió la flecha que se produce a la altura de la fibra neutra entre dos puntos centrales separados una distancia equivalente a cinco veces la altura de la sección (5h).

Con estos resultados se calculó el módulo de elasticidad local y se comparó con el módulo de elasticidad global de las mismas, obtenido de acuerdo a lo explicado en el apartado 5.12.2 y los valores se pueden ver en la tabla 6.11.

Módulo de elasticidad global		Módulo de elasticidad local	
valor medio (N/mm ²)	CV (%)	valor medio (N/mm ²)	CV (%)
8.952	23,7	9.684	28,6

Tabla 6.11 Valor medio y coeficiente de variación del módulo de elasticidad global y local

La norma UNE-EN 384:2010 incluye una expresión en su apartado 5.3.2 para la determinación del valor medio del módulo de elasticidad de la muestra, \bar{E} , que según se indica, incluye una corrección para deducir el módulo de elasticidad en flexión pura (sin el efecto del cortante).

$$\bar{E} = 1,3 \cdot \frac{\sum E_i}{n} - 2.690$$

Donde E_i es el i-ésimo valor del módulo de elasticidad desde 1 hasta n.

De esta manera, implícitamente, supone que se parte del módulo de elasticidad obtenido globalmente (incluyendo el efecto del cortante) para llegar a obtener el módulo de elasticidad local (libre de cortante). La expresión queda con el siguiente formato:

$$E_{loc} = 1,3 \cdot E_{glo} - 2.690$$

donde:

E_{loc} : es el módulo de elasticidad local en N/mm²;

E_{glo} : es el módulo de elasticidad global en N/mm².

Esta relación propuesta está siendo cuestionada, debido a que la configuración del ensayo, la influencia de los defectos concentrados en la zona central de 5h y el tamaño de la probeta influyen sustancialmente en dicho resultado. Aun así, las diferencias de asignación de clase resistente son mínimas y, en todo caso, van a favor de la seguridad.

Analizando los resultados obtenidos para la muestra ensayada, la relación entre módulos de elasticidad, con un coeficiente de correlación R^2 del 0,94 %, toma la siguiente expresión:

$$E_{loc} = 1,126 \cdot E_{glo} - 576$$

donde:

E_{loc} : es el módulo de elasticidad local en N/mm^2 ;

E_{glo} : es el módulo de elasticidad global en N/mm^2 .

En la figura 6.26 se muestra la relación lineal entre ambos módulos de elasticidad.

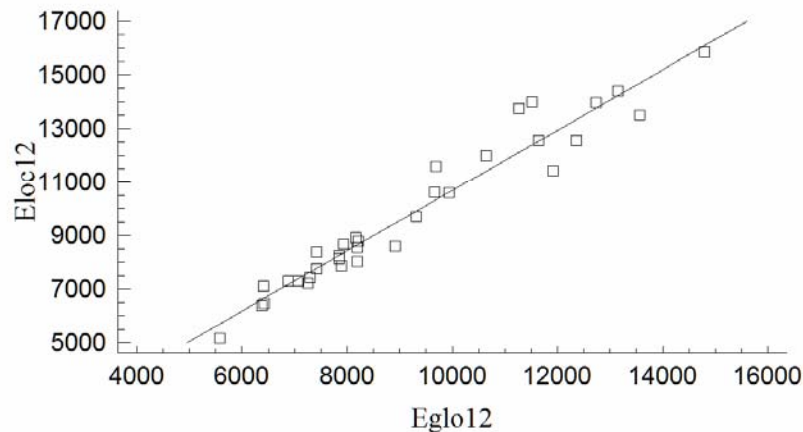


Figura 6.26 Recta de regresión entre el módulo de elasticidad local(ordenadas) y global(abcisas).

La realización del ensayo mecánico de flexión con el dispositivo de medición de la deformación para realizar el cálculo del módulo de elasticidad local resulta más compleja, y a su vez el error de medición puede aumentar. Esto último puede comprobarse al comparar los coeficientes de variación de ambas medidas: 24 % para el módulo global y 29 % para el módulo local.

Debido a ello, algunos autores (Ridley 2009, Khokhar 2011) son partidarios de obtener el módulo de elasticidad local a partir del módulo de elasticidad global en lugar de utilizar el ensayo de la flecha en el tramo central de 5 veces el canto, por considerar que es más preciso.

En el Anexo 1 “Consideraciones sobre el módulo de elasticidad global y local” se recoge con más detalle la metodología de ensayo propuesta en la reciente versión de la norma UNE-EN 408:2011 y los resultados obtenidos.

6.4.3. Tiempo de transmisión de ondas

6.4.3.1. Velocidad de propagación de onda ultrasónica

El tiempo que tarda la señal ultrasónica desde el emisor al receptor, conocida la distancia entre ambos, permite obtener la velocidad de propagación mediante una simple división entre la distancia y el tiempo. En la tabla 6.12 se recoge el valor medio de la velocidad medida entre testas y referida al 12 % de contenido de humedad. La distribución de probabilidad de la variable “velocidad de propagación” corresponde con una distribución normal, figura 6.27.

Velocidad de ultrasonidos	
valor medio (m/s)	CV (%)
4.968	9,93

Tabla 6.12 Valor medio y coeficiente de la velocidad de propagación de ultrasonidos referida al 12% de humedad y medida de testa a testa

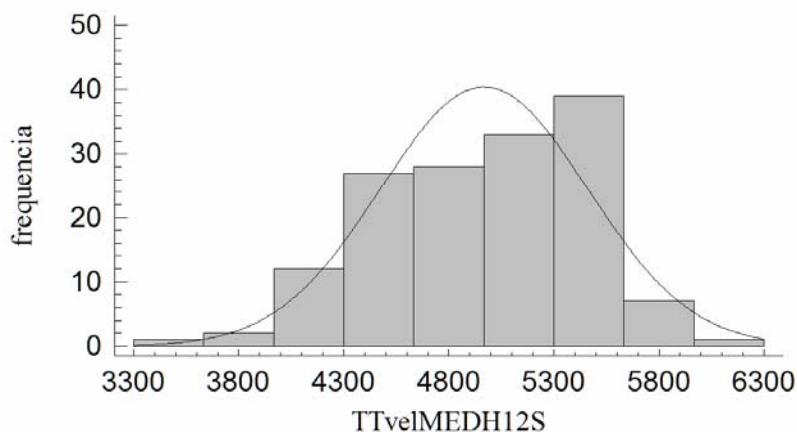


Figura 6.27 Histograma de frecuencias de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica en la lectura directa testa-testa al 12 %

Tal y como se explica en el apartado 5.8, en el lote de 150 piezas de pino radiata de sección 80x120 mm, también se registraron las lecturas del tiempo de propagación de la onda ultrasónica colocando los sensores en las caras de la probeta, ya que en muchos casos será imposible colocarlos en las testas. Un caso típico de imposibilidad de colocación en las testas suele darse en el estudio de elementos de madera en estructuras en servicio. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.13.

Lectura	Velocidad	
	Valor medio (m/s)	CV (%)
directa testa-testa	4.968	9,93
directa cara-cara	4.814	9,82
indirecta cara-cara	4.814	9,82

Tabla 6.13 Valor medio y coeficiente de variación de la velocidad de propagación de diferentes lecturas ultrasónicas en pino radiata de sección 80x120 mm

Las relaciones lineales que existen entre las distintas velocidades de propagación, con un intervalo de confianza del 99 %, son las siguientes:

$$Vel_{TT} = 91,924 + 1,01281 Vel_{HD18} \quad R^2: 0,95$$

$$Vel_{TT} = 127,493 + 1,00551 Vel_{HI18} \quad R^2: 0,93$$

donde:

Vel_{TT} : velocidad media de ultrasonidos, en m/s, de la lectura directa, testa-testa, corregida al 12 % de contenido de humedad;

Vel_{HD18} : velocidad media de ultrasonidos, en m/s, de lectura directa, cara-cara, corregida al 12 % de contenido de humedad;

Vel_{HI18} : velocidad media de ultrasonidos en, m/s, de lectura indirecta, cara-cara, corregida al 12 % de contenido de humedad.

La figura 6.28 muestra gráficamente la recta de regresión lineal entre las velocidades de propagación directas entre testa-testa y cara-cara.

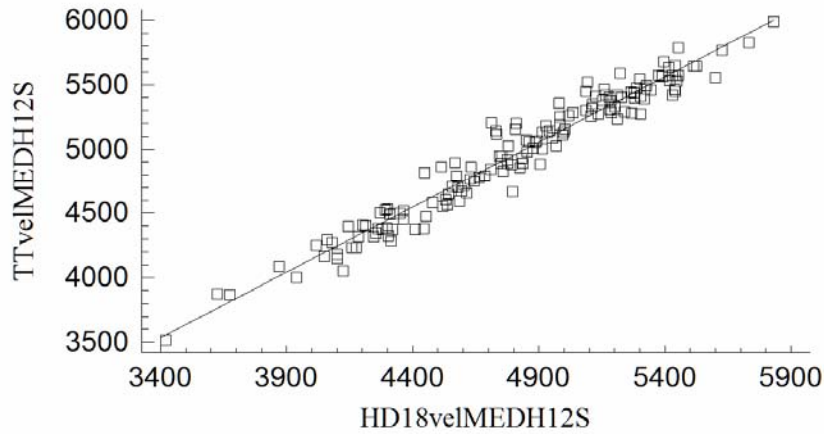


Figura 6.28 Recta de regresión lineal entre la velocidad de ultrasonidos de la lectura directa testa-testa y directa cara-cara

6.4.3.2. Velocidad de propagación de onda de impacto

El tiempo de transmisión de la onda de impacto entre dos puntos del material con una distancia de separación conocida, permite calcular la velocidad de propagación de la onda de impacto mediante el cociente entre dicha distancia y el tiempo.

En la tabla 6.14 se recoge el valor medio de la velocidad medida entre testas y referida al 12 % de contenido de humedad. La distribución de probabilidad de la variable “velocidad de propagación” corresponde con una distribución normal, figura 6.29.

Velocidad de onda de impacto	
valor medio (m/s)	CV (%)
4.719	9,61

Tabla 6.14 Valor medio y coeficiente de la velocidad de propagación de onda de impacto referida al 12% de humedad y medida de testa a testa

El valor medio de la velocidad de onda de impacto medio entre testas fue de 4.719 m/s con un coeficiente de variación de 9,61 %. La distribución de probabilidad de la variable “velocidad de propagación” corresponde con una distribución normal, figura 6.29.

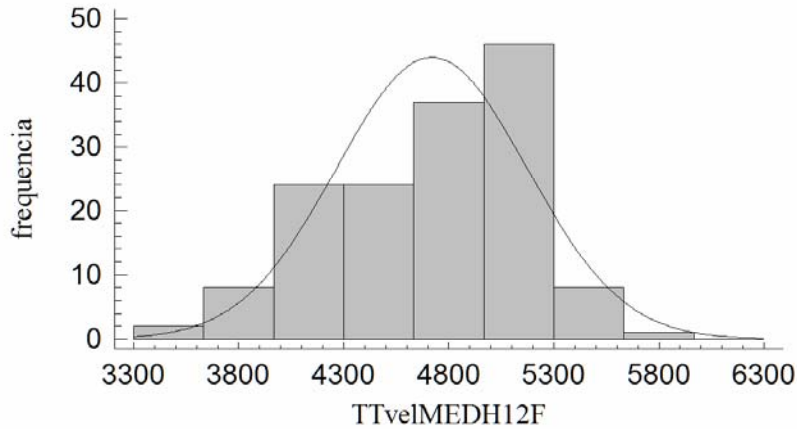


Figura 6.29 Histograma de frecuencias de la velocidad de propagación (m/s) de la onda de impacto en la lectura directa testa-testa al 12 %

Al igual que en el caso anterior (ultrasonidos) además de las lecturas testa a testa, también se registraron las lecturas del tiempo de propagación de la onda de impacto colocando los sensores sobre las caras opuestas así como entre la misma cara .

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.15.

Lectura	Velocidad	
	valor medio (m/s)	CV (%)
directa testa-testa	4.719	9,61
directa cara-cara	4.497	9,32
indirecta cara-cara	4.488	9,47

Tabla 6.15 Valor medio y coeficiente de variación de la velocidad de propagación de diferentes lecturas de las ondas de impacto

Las relaciones lineales que existen entre las distintas velocidades de propagación, con un intervalo de confianza del 99 %, son las siguientes:

$$Vel_{TT} = -33,2308 + 1,05686 \cdot Vel_{HD18} \quad R^2: 0,95$$

$$Vel_{TT} = 68,1505 + 1,03627 \cdot Vel_{HI18} \quad R^2: 0,94$$

donde:

Vel_{TT} : es la velocidad media de la onda de impacto, en m/s, de la lectura directa, testa-testa, corregida al 12 % de contenido de humedad;

Vel_{HD18} : es la velocidad media de la onda de impacto, en m/s, de lectura directa, cara-cara, corregida al 12 % de contenido de humedad;

Vel_{HI18} : es la velocidad media de la onda de impacto, en m/s, de lectura indirecta, cara-cara corregida al 12 % de contenido de humedad.

La figura 6.30 muestra gráficamente la recta de regresión lineal entre las velocidades de propagación directas entre testa-testa y cara-cara.

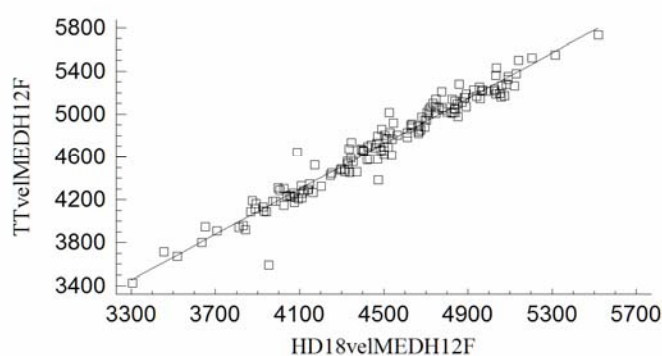


Figura 6.30 Recta de regresión lineal entre la velocidad de la onda de impacto (m/s) de la lectura directa testa-testa (abscisas) y directa cara-cara (ordenadas)

Se cumplen las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia en los análisis de regresión simple.

6.4.4. Frecuencia natural de vibración

6.4.4.1 Frecuencia natural de vibración longitudinal

Se procedió a calcular la frecuencia de vibración longitudinal mediante el ensayo de vibración inducida, cuyo método se explica en el apartado 5.10.1, permite calcular la velocidad llamada de vibración, mediante el producto de dos veces la longitud de la probeta por dicha frecuencia.

Los resultados del ensayo de velocidad de vibración se recogen en la tabla 6.16

Velocidad vibración	
valor medio (m/s)	CV (%)
4.411	10,84

Tabla 6.16 Valor medio y coeficiente de variación de la velocidad obtenida por vibración longitudinal

Estos valores están referidos a un contenido de humedad del 12%, con la corrección indicada en el apartado 5.10.1.

La distribución de probabilidad de la variable “velocidad de vibración” corresponde con una distribución normal con un nivel de confianza del 90 %, figura 6.31.

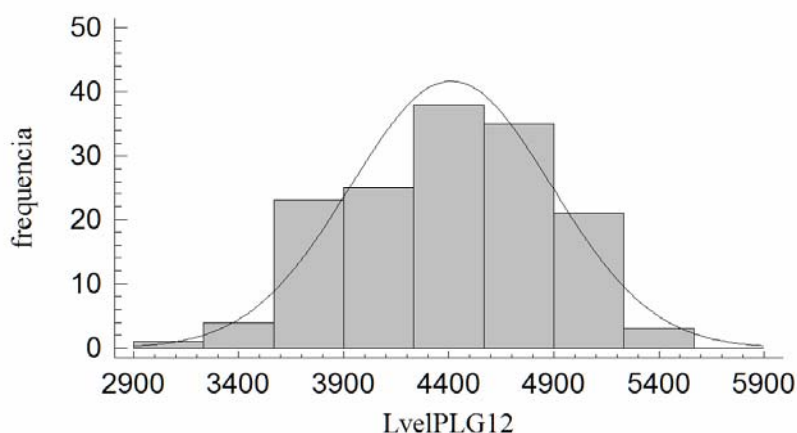


Figura 6.31 Histograma de frecuencias de la velocidad obtenida por vibración longitudinal

6.4.4.2. Frecuencia de vibración transversal (o de flexión)

El cálculo de la frecuencia de vibración transversal o de flexión mediante el ensayo de vibración inducida, tal y como se explica en el apartado 5.10.2, permite calcular la frecuencia natural de vibración a flexión. A continuación, mediante la fórmula (ec. 5.3) en la que se conocen, la masa, las dimensiones y la densidad (del ensayo anterior Frecuencia natural de vibración longitudinal), se obtiene el módulo de elasticidad dinámico obtenido en flexión, $E_{din,t}$.

Los resultados del ensayo se recogen en la tabla 6.17:

Módulo de de elasticidad dinámico obtenido en flexión	
valor medio (N/mm ²)	CV (%)
10.010	24,10

Tabla 6.17 Valor medio y coeficiente de variación módulo de elasticidad dinámico obtenido en flexión

La distribución de probabilidad de la variable " $E_{din,t}$ " corresponde con una distribución normal, figura 6.32.

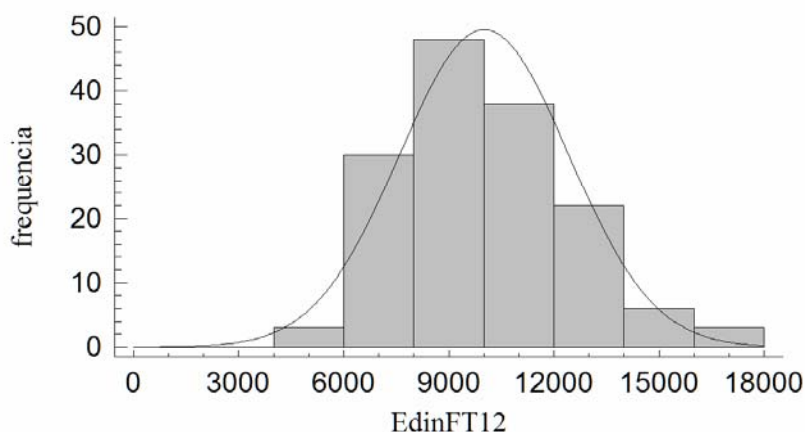


Figura 6.32. Histograma de frecuencias módulo de elasticidad dinámico obtenido en flexión

6.4.5. Módulo de elasticidad estático vs. dinámicos

El módulo de elasticidad dinámico es el parámetro no destructivo más empleado como estimador de las propiedades mecánicas debido a su alto grado de predicción y se obtiene como producto de la velocidad de propagación elevada al cuadrado por la densidad,

La relación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico en madera ha sido estudiada por numerosos autores (Perstorper, 1994; Tanaka et al., 1991), encontrándose coeficientes de determinación, R^2 , del orden de 0,90 - 0,96 para madera libre de defectos. Esta relación para madera en tamaño comercial de gran escuadría se reduce a un orden de 0,74 a 0,76 en madera de pino silvestre, laricio y radiata (Íñiguez 2007).

En este trabajo se ha calculado el módulo de elasticidad dinámico utilizando, tanto la velocidad de propagación de ultrasonidos, la velocidad obtenida por onda de impacto así como la velocidad obtenida por vibración longitudinal y la densidad global. Así mismo se ha usado el módulo de elasticidad dinámico obtenido en el ensayo de vibración transversal. Los valores obtenidos se comparan con el módulo de elasticidad estático, es decir, el calculado a partir del ensayo de flexión, se obtienen los resultados de la tabla 6.18.

	Valor medio (N/mm ²)	CV (%)	Relación	
			E_{glo} / E_{glo}	
E_{glo}	8.952	23,7	E_{glo} / E_{glo}	1,00
E_{din} - ultrasonidos	12.544	24,7	$E_{din\ ult} / E_{glo}$	1,40
E_{din} – onda impacto	11.319	24,6	$E_{din\ imp} / E_{glo}$	1,26
E_{din} – vibración Longitudinal	9.908	26,3	$E_{din\ viv\ l} / E_{glo}$	1,11
E_{din} – vibración Flexión	10.010	24,1	$E_{din\ viv\ t} / E_{glo}$	1,12

Tabla 6.18 Valor medio y coeficiente de variación de los módulos de elasticidad estático y dinámicos de ultrasonidos, de onda de impacto, de vibración longitudinal y de vibración transversal. $E_{din\ ult}$ y $E_{din\ imp}$ velocidad testa a testa. Densidad rebanaada al 12%.

Las distribuciones de probabilidad del módulo de elasticidad dinámico corresponden con distribuciones sensiblemente normales, figuras 6.33, 6.34, 6.35 y 6.36.

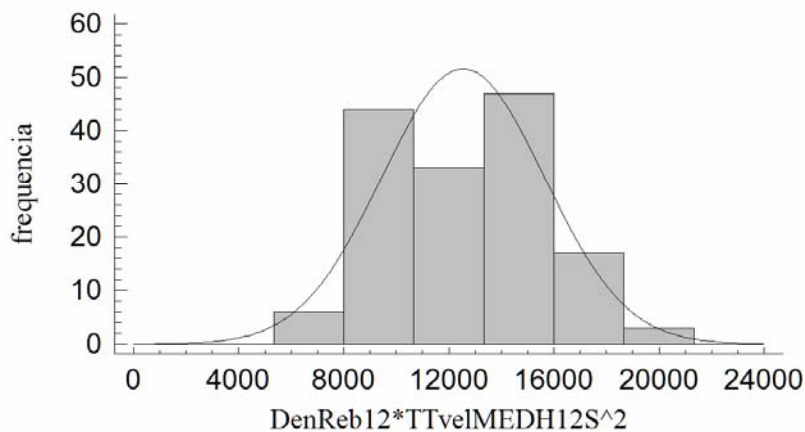


Figura 6.33. Histograma de frecuencias del módulo de elasticidad dinámico obtenido por ultrasonidos

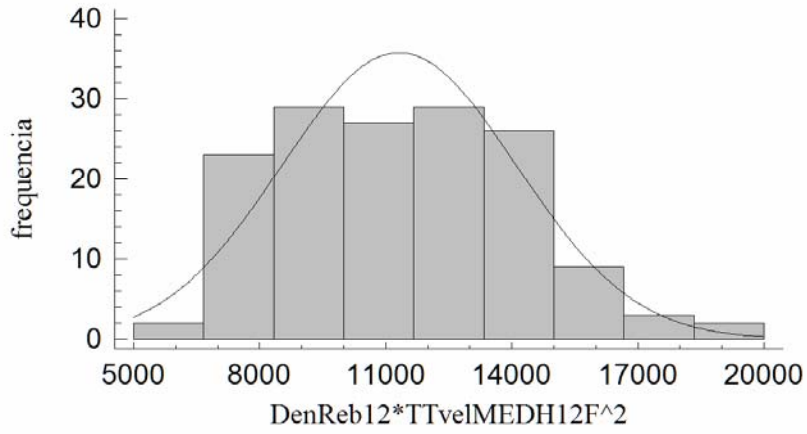


Figura 6.34. Histograma de frecuencias del módulo de elasticidad dinámico obtenido por onda de impacto

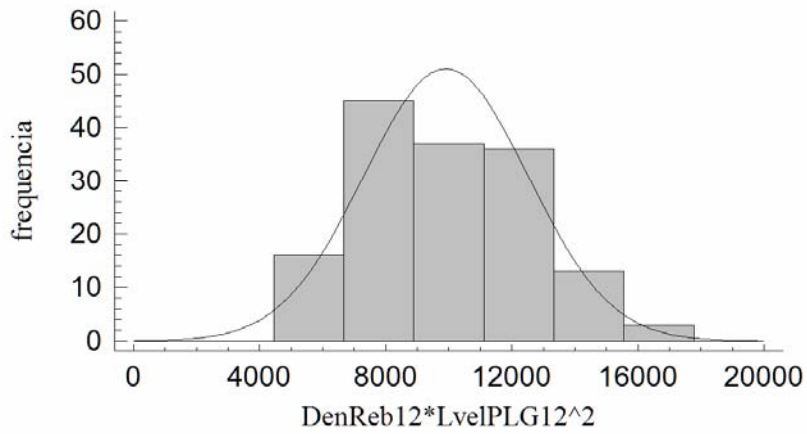


Figura 6.35. Histograma de frecuencias del módulo de elasticidad dinámico obtenido por vibración longitudinal

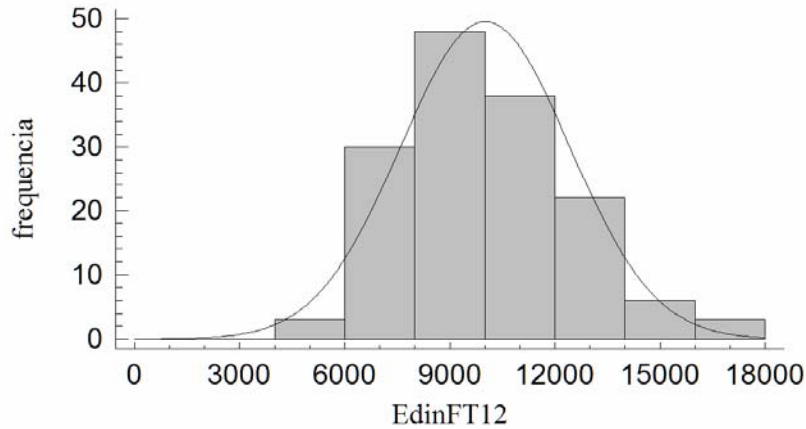


Figura 6.36. Histograma de frecuencias del módulo de elasticidad dinámico obtenido por vibración a flexión (o transversal)

De un primer análisis se observa, que las diferencias entre los valores medios con respecto al módulo de elasticidad estático son de un 1,40 para el módulo de elasticidad dinámico calculado con la velocidad de ultrasonidos, de un 1,26 con el calculado con la velocidad de onda de impacto, de un 1,11 con el calculado con la velocidad de vibración longitudinal y de un 1,12 con el calculado con la velocidad de vibración a flexión (o transversal).

La diferencia entre módulos de elasticidad ha sido estudiada en madera libre de defectos por los profesores Divos y Tanaka, concluyendo que la fluencia es la principal responsable de tal variación (Divos et al., 2005). Estos autores sostienen que la fluencia del material existe no sólo en procesos de larga duración, sino incluso en los breves. De ahí que las diferencias de tiempo característico de cada ensayo hagan que los resultados difieran, proponiendo la siguiente relación:

$$E_{t_1} = E_{t_2} \cdot (1 + 0,017 \cdot \log(t_2 / t_1))$$

donde:

E_{t_i} : es el módulo de elasticidad en N/mm^2 determinado por el procedimiento de ensayo, i , con el tiempo característico t_i , siendo $i= 1$ o 2 ;

t_i : es el tiempo característico en segundos del ensayo.

Por tanto, las diferencias entre módulos de elasticidad obtenidos podrían quedar explicadas por la fluencia y por el efecto descrito por estos autores.

Como el objetivo es estimar el módulo de elasticidad estático a partir del módulo de elasticidad dinámico, lo que se hace es plantear una regresión lineal.

De este análisis estadístico con un intervalo de confianza del 99 %, y tras comprobar que se cumplen las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia (con alguna excepción que se aleja ligeramente de la normalidad), se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} E_{glo} &= 1.190,7 + 0,619654 \cdot E_{din\ ult} & R^2: 0,82 \\ E_{glo} &= 1.357,71 + 0,671581 \cdot E_{din\ imp} & R^2: 0,78 \\ E_{glo} &= 1.537,61 + 0,749009 \cdot E_{din\ vib,l} & R^2: 0,85 \\ E_{glo} &= 822,543 + 0,811151 \cdot E_{din\ vib,t} & R^2: 0,86 \end{aligned}$$

donde:

E_{glo} : es el módulo de elasticidad global en N/mm^2 al 12 % de humedad;

$E_{din\ ult}$: es el módulo de elasticidad dinámico de ultrasonidos en N/mm^2 , calculado mediante el producto de la densidad global en kg/m^3 al 12 % de humedad y el cuadrado de la velocidad de ultrasonidos testa-testa en m/s al 12 % de humedad;

$E_{din\ imp}$: es el módulo de elasticidad dinámico de ultrasonidos en N/mm^2 , calculado mediante el producto de la densidad global en kg/m^3 al 12 % de humedad y el cuadrado de la velocidad de onda de impacto testa-testa en m/s al 12 % de humedad;

$E_{din\ vib,l}$: es el módulo de elasticidad dinámico de vibración longitudinal en N/mm^2 , calculado mediante el producto de la densidad global en kg/m^3 al 12 % de humedad y el cuadrado de la velocidad de vibración longitudinal en m/s al 12 % de humedad;

$E_{din\ vib,t}$: es el módulo de elasticidad dinámico de vibración en flexión (o transversal) en N/mm^2 , obtenido mediante el ensayo de análisis de Frecuencia natural de vibración transversal, al 12 % de humedad;

6.4.6. Módulo de elasticidad estático vs. velocidad

La principal finalidad de los ensayos no destructivos es la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Evidentemente, la predicción de las mismas será mejor si se utiliza el módulo de elasticidad dinámico que si sólo se emplea el parámetro de velocidad. Sin embargo, esto implica la determinación de la densidad, lo que no es fácil en el proceso de producción de un aserradero, o más aún, en el caso de piezas colocadas en obra para una peritación.

Por este motivo, se muestran a continuación las relaciones lineales existentes entre las propiedades mecánicas y la velocidad.

Los modelos de regresión lineal ajustados, con un intervalo de confianza del 99 %, son:

$$E_{glo} = -9.137,40 + 3,64124 \cdot Vel_{ult} \quad R^2: 0,72$$

$$E_{glo} = -9.580,12 + 3,92571 \cdot Vel_{imp} \quad R^2: 0,70$$

$$E_{glo} = -7.849,63 + 3,80765 \cdot Vel_{vib,1} \quad R^2: 0,73$$

donde:

E_{glo} : es el módulo de elasticidad global en N/mm^2 al 12 % de humedad;

Vel_{ult} : es la velocidad media de ultrasonidos en m/s de la lectura directa testa-testa corregida al 12 % de contenido de humedad;

Vel_{imp} : es la velocidad media de onda de impacto en m/s;

$Vel_{vib,1}$: es la velocidad media de vibración longitudinal en m/s;

Las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia se cumplen.

6.5. Tensión de rotura

6.5.1. Tensión de rotura a flexión

La tensión de rotura a flexión se calcula conforme a la metodología de ensayo descrita en el apartado 5.12.3. En la tabla 6.19 se muestran los resultados obtenidos para la muestra de estudio.

Tensión de rotura		
valor caract. (N/mm^2)	valor medio (N/mm^2)	CV (%)
18,67	42,95	31,4

Tabla 6.19 Valor característico, valor medio y coeficiente de variación de la tensión de rotura

En la figura 6.42 se representa el histograma de frecuencias de la variable “LOG (tensión de rotura)” para toda la muestra. La distribución es normal para un nivel de confianza del 90 % con un P-valor $< 0,10$.

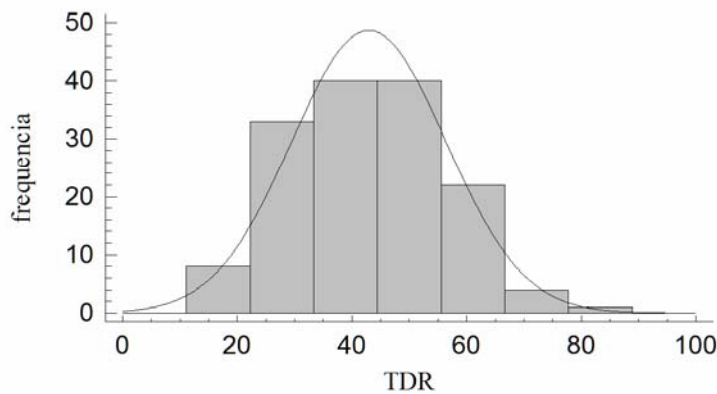


Figura 6.37 Histograma de frecuencias de la tensión de rotura (N/mm^2) de toda la muestra

6.5.2. Tensión de rotura a flexión vs. módulo de elasticidad dinámico

Tal como se ha comentado con anterioridad, el módulo de elasticidad dinámico es el parámetro no destructivo más empleado como estimador de las propiedades mecánicas. Utilizándose tanto para la estimación del módulo de elasticidad como de la resistencia a flexión (tensión de rotura) de la madera.

Usando este principio y basándonos en los resultados de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica y de vibración, desarrollados en los apartados 6.3.3 y 6.3.4, respectivamente, se realiza una regresión lineal planteando como variable dependiente la tensión de rotura.

De este análisis estadístico, con un intervalo de confianza del 99 % y tras comprobar que se cumplen las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia, se obtienen las siguientes expresiones:

$$T_{rot} = 8,37506 + 0,00275284 \cdot E_{din\ ult} \quad R^2: 0,40$$

$$T_{rot} = 8,33277 + 0,00305327 \cdot E_{din\ imp} \quad R^2: 0,40$$

$$T_{rot} = 7,95454 + 0,00352574 \cdot E_{din\ vib,l} \quad R^2: 0,47$$

$$T_{rot} = 3,24698 + 0,00395718 \cdot E_{din\ vib,t} \quad R^2: 0,50$$

donde:

T_{rot} : es el valor de la tensión de rotura a flexión en N/mm^2 ;

$E_{din\ ult}$: es el módulo de elasticidad dinámico de ultrasonidos en N/mm^2 , calculado mediante el producto de la densidad global en kg/m^3 al 12 % de humedad y el cuadrado de la velocidad de ultrasonidos testa-testa en m/s al 12 % de humedad;

$E_{din\ imp}$: es el módulo de elasticidad dinámico de onda de impacto en N/mm^2 , calculado mediante el producto de la densidad global en kg/m^3 al 12 % de humedad y el cuadrado de la velocidad de onda de impacto testa-testa en m/s al 12 % de humedad;

$E_{din\ vib,l}$: es el módulo de elasticidad dinámico de vibración longitudinal en N/mm^2 , calculado mediante el producto de la densidad global en kg/m^3 al 12 % de humedad y el cuadrado de la velocidad de vibración longitudinal en m/s al 12 % de humedad;

$E_{din\ vib,t}$: es el módulo de elasticidad dinámico de vibración a flexión (o transversal) en N/mm^2 , obtenido mediante el ensayo de análisis de Frecuencia natural de vibración transversal, al 12 % de humedad;

6.5.3. Tensión de rotura a flexión vs. velocidad

De igual modo a lo que ocurre en el caso del módulo de elasticidad, apartado 6.3.5, la predicción de la tensión de rotura será mejor si se utiliza el módulo de elasticidad dinámico que si sólo se emplea el parámetro de velocidad. Sin embargo, el uso de este estimador requiere de la determinación de la densidad, lo que no es fácil en un aserradero o en piezas colocadas en obra.

De ahí que se presenten los modelos de regresión lineal ajustados para la velocidad, tanto de propagación de ultrasonidos como de vibración longitudinal:

$$T_{rot} = - 25,4604 + 0,0137604 \cdot Vel_{ult} \quad R^2: 0,25$$

$$T_{rot} = - 29,1094 + 0,0152543 \cdot Vel_{imp} \quad R^2: 0,26$$

$$T_{rot} = - 26,8833 + 0,0158146 \cdot Vel_{vib,l} \quad R^2: 0,31$$

donde:

T_{rot} : es el valor de la tensión de rotura a flexión en N/mm^2 ;

Vel_{ult} : es la velocidad media de ultrasonidos en m/s de la lectura directa testa-testa corregida al 12 % de contenido de humedad;

Vel_{imp} : es la velocidad media de onda de impacto en m/s de la lectura directa testa-testa corregida al 12 % de contenido de humedad;

Vel_{vib} : es la velocidad media de vibración longitudinal en m/s corregida al 12 % de contenido de humedad;

Las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia se cumplen.

6.5.4 Corrección por nudosidad

Normalmente, los resultados que se obtienen de la estimación de las propiedades mecánicas de la madera a partir de variables no destructivas, son mejores para el módulo de elasticidad que para la tensión de rotura. De hecho, los resultados de la presente investigación así lo corroboran, ya que se alcanzan coeficientes de determinación, R^2 , para ajustes de predicción a partir del módulo de elasticidad dinámico, de 0,78 a 0,86 para el módulo de elasticidad y de 0,40 a 0,50 para la tensión de rotura.

Una posible explicación podría consistir en el hecho de que al medir el módulo de elasticidad dinámico se miden las propiedades de la pieza completa, lo que está mejor relacionado con el módulo de elasticidad del material, mientras que por otro lado, la resistencia depende de la presencia de singularidades locales en la pieza, lo que hace que su predicción mediante un estimador global, como es el módulo de elasticidad dinámico, sea más baja.

Por tanto, debido a que la singularidad de

mayor relevancia en la clasificación visual y en las propiedades mecánicas es el tamaño de los nudos, se plantea a continuación una corrección de la estimación de la tensión de rotura basada en éste parámetro.

Se define la Relación de Diámetro de Nudo (KDR, Knot Diameter Ratio) como el diámetro del nudo dividido por el canto o el ancho de la sección. La Relación de Diámetro de Nudo Concentrado (CKDR, Concentrated Knot Diameter Ratio) es la suma de los KDRs correspondientes a los nudos existentes en una longitud de 15 cm de la pieza de madera. El valor máximo de CKDR que incluye las cuatro caras de la pieza representa la calidad de la probeta, figura 6.38 (Divos, 2011b).

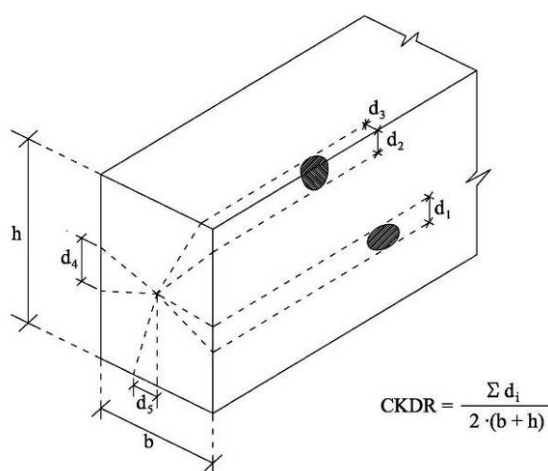


Figura 6.38 Relación de Diámetro de Nudo Concentrado (CKDR, Concentrated Knot Diameter Ratio, Divos)

Se utiliza este parámetro, el CKDR, como indicador de la importancia del tamaño de los nudos en la peor sección de la pieza. En la tabla 6.20 se muestran los valores medios de los índices CKDR.

CKDR	
valor medio	CV (%)
0,3207	37,9

Tabla 6.20 Valor medio y coeficiente de variación de la nudosidad (CKDR)

Con el fin de intentar mejorar la predicción de la tensión de rotura a partir del módulo de elasticidad dinámico se introduce el factor CKDR en una regresión lineal múltiple.

De este análisis estadístico, con un intervalo de confianza del 99 % y tras comprobar que se cumplen las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia, se obtienen las siguientes expresiones:

$$T_{rot} = 24,7213 + 0,00220017 \cdot E_{din\ ult} - 29,3015 \cdot CKDR \quad R^2: 0,46$$

$$T_{rot} = 24,8501 + 0,00244007 \cdot E_{din\ imp} - 29,8001 \cdot CKDR \quad R^2: 0,46$$

$$T_{rot} = 22,0506 + 0,00294528 \cdot E_{din\ vib,l} - 25,9667 \cdot CKDR \quad R^2: 0,51$$

$$T_{rot} = 16,6256 + 0,0033778 \cdot E_{din\ vib,t} - 23,5706 \cdot CKDR \quad R^2: 0,54$$

donde:

T_{rot} : es el valor medio de la tensión de rotura a flexión en N/mm^2 ;

$E_{din\ ult}$: es el módulo de elasticidad dinámico de ultrasonidos en N/mm^2 , calculado mediante el producto de la densidad global en kg/m^3 al 12 % de humedad y el cuadrado de la velocidad de ultrasonidos testa-testa en m/s al 12 % de humedad;

$E_{din\ imp}$: es el módulo de elasticidad dinámico de onda de impacto en N/mm^2 , calculado mediante el producto de la densidad global en kg/m^3 al 12 % de humedad y el cuadrado de la velocidad de onda de impacto testa-testa en m/s al 12 % de humedad;

$E_{din\ vib,l}$: es el módulo de elasticidad dinámico de vibración longitudinal en N/mm^2 , calculado mediante el producto de la densidad global en kg/m^3 al 12 % de humedad y el cuadrado de la velocidad de vibración longitudinal en m/s al 12 % de humedad;

$E_{din\ vib,t}$: es el módulo de elasticidad dinámico de vibración a flexión en N/mm^2 , obtenido mediante el ensayo de frecuencia natural de vibración transversal al 12 % de humedad;

CKDR: Relación de Diámetro de Nudo Concentrado;

Si se comparan los resultados de la bondad de ajuste sin utilizar y utilizando el factor CKDR, vemos que se pasa de un R^2 de 0,40 a 0,46 para el procedimiento de ultrasonidos, de 0,40 a 0,46 para la onda de impacto, de 0,47 a 0,51 para el de vibración longitudinal, y de 0,50 a 0,54 para la vibración transversal, respectivamente. De ahí se deduce que la corrección propuesta es válida. Como término medio el coeficiente de determinación aumenta un 11 % al considerar la nudosidad.

6.6. Tensión de rotura a flexión, módulo de elasticidad y densidad

Los valores de tensión de rotura a flexión, módulo de elasticidad global y densidad local, fueron calculados a partir de los ensayos mecánicos realizados conforme a la norma UNE-EN 408: 2011 y a la metodología de ensayo descrita en los apartados 5.3.2 y 5.9. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 6.21.

Tensión de rotura		Módulo de elasticidad		Densidad	
valor medio (N/mm ²)	CV (%)	valor medio (N/mm ²)	CV (%)	valor medio (kg/m ³)	CV (%)
42,95	31%	8.952	24	501	12

Tabla 6.21 Valor medio y coeficiente de variación de la tensión de rotura, el módulo de elasticidad global y la densidad

La relación existente entre las propiedades físicas y mecánicas de la madera difiere enormemente según se trate de madera libre de defectos o de tamaño estructural, según sea la especie y su procedencia, según sea el tamaño de sección o el método de ensayo seguido. Por tanto, es difícil hablar de unos coeficientes de determinación característicos para las regresiones lineales entre estas variables. Sin embargo, a modo de orientación se presentan en la tabla 6.22, algunos de los resultados presentes en la bibliografía.

Referencia	Especie	Producto	Coefficiente de determinación: R ²
Iñiguez, G. (2007)	<i>Pinus radiata</i> , <i>Pinus sylvestris</i> y <i>Pinus nigra</i> subsp. <i>salzmannii</i>	madera aserrada tamaño estructural gruesa escuadría	MOR vs. MOE: 0,65 MOR vs. dens.: 0,29 MOE vs. dens.: 0,28
Bengtsson, D. (2006)	---	madera libre de defectos	MOR vs. MOE: 0,76 MOR vs. dens.: 0,66 MOE vs. dens.: 0,64
Hanhijärvi, A. (2005)	<i>Pinus sylvestris</i>	madera aserrada tamaño estructural	MOR vs. MOE: 0,69 MOR vs. dens.: 0,58 MOE vs. dens.: 0,72
Hanhijärvi, A. (2005)	<i>Picea abies</i>	madera aserrada tamaño estructural	MOR vs. MOE: 0,67 MOR vs. dens.: 0,37 MOE vs. dens.: 0,58
Esteban, M. (2003)	<i>Pinus sylvestris</i> y <i>Pinus pinaster</i>	madera aserrada tamaño estructural gruesa escuadría	MOR vs. MOE: 0,61 MOR vs. dens.: 0,15 MOE vs. dens.: 0,10
Conde, M. (2003)	<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>salzmannii</i>	madera aserrada tamaño estructural	MOR vs. MOE: 0,51 MOR vs. dens.: 0,31 MOE vs. dens.: 0,30
Hermoso, E. (2001)	<i>Pinus sylvestris</i>	madera aserrada tamaño estructural	MOR vs. MOE: 0,54 MOR vs. dens.: 0,20 MOE vs. dens.: 0,24

Tabla 6.22 Coeficientes de determinación de las relaciones lineales entre las propiedades físicas y mecánicas de la madera

Las rectas de regresión lineal y sus coeficientes de determinación para la muestra objeto de estudio, con un intervalo de confianza del 99 %, son las siguientes:

$$T_{rot} = 1,60261 + 0,00461211 \cdot E_{glo} \quad R^2: 0,53$$

$$T_{rot} = -13,2378 + 0,112179 \cdot Den_{10c} \quad R^2: 0,24$$

$$E_{glo} = 242,187 + 17,4138 \cdot Den_{10c} \quad R^2: 0,23$$

donde:

T_{rot} : es el valor de la tensión de rotura a flexión en N/mm^2 ;

E_{glo} : es el módulo de elasticidad global en N/mm^2 ;

Den_{10c} : es la densidad de la rebanada al 12 % de humedad en kg/m^3 .

Se cumplen las hipótesis de normalidad, linealidad, homocedasticidad e independencia en los análisis de regresión simple.

La figura 6.38 muestra gráficamente la recta de regresión entre la tensión de rotura y el módulo de elasticidad global para toda la muestra.

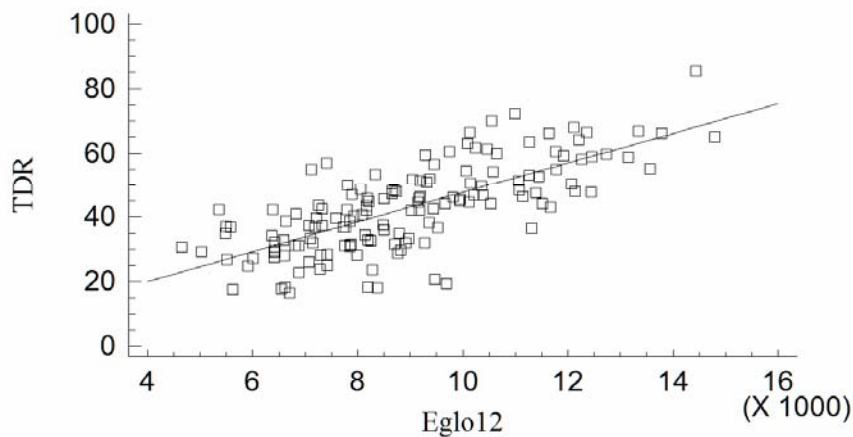


Figura 6.38 Recta de regresión lineal entre la tensión de rotura a flexión y el módulo de elasticidad global para toda la muestra

CAPÍTULO 7:

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. Metodología

La metodología empleada en este trabajo no surge de la nada, sino que es la continuación natural de otros trabajos realizados anteriormente por otros equipos. Sin el esfuerzo y experiencia de estos grupos este trabajo hubiera resultado mucho más arduo o quizás imposible. El basarse en trabajos anteriores valida, al menos parcialmente, la metodología empleada.

Un logro importante de este trabajo ha sido poner a punto un laboratorio, en la UPC, capaz de investigar en este campo de la caracterización mecánica de la madera y en la aplicación de las técnicas no destructivas tanto para la madera nueva, como para la madera puesta en obra en el campo de la diagnosis, que es un campo de especial interés del laboratorio de materiales de la EPSEB-UPC.

Así mismo, este trabajo ha permitido colaborar con grupos de investigación externos a nuestra universidad, como el Grupo Construcción con madera de la ETSI de Montes de la UPM, el INCAFUST, y con los investigadores del Laboratorio de Estructuras de Madera del INIA.

Como consecuencia de este trabajo el autor ha entrado a formar parte del subcomité 6 de Estructuras de madera dentro del Comité Técnico de Normalización 56 de Madera y Corcho.

Dentro de las aportaciones de este trabajo a la metodología se pueden destacar las siguientes:

- Aplicación del análisis de vibraciones en flexión para la estimación del módulo de elasticidad dinámico.
- Aplicación del ensayo de ondas de impacto para la estimación del módulo de elasticidad dinámico.
- Utilización de la técnica de extracción de testigos para la estimación de la densidad con mejores resultados que otras técnicas no destructivas y que parece especialmente adecuado para algunos tipos de elementos estructurales.
- Ampliación de la base de datos para la caracterización de maderas estructurales de gran escuadría españolas que ha permitido acotar mas o mejor los valores mecánicos asignados a las clases resistentes de maderas de coníferas de gran escuadría contempladas por la normativa española.
- Utilización de la fotografía digital para realizar el registro detallado de todas las piezas ensayadas. Esto permite la verificación, en cualquier momento del proceso, de los parámetros registrados de manera manual, así como la posibilidad de reinterpretar el

proceso de clasificación en posteriores trabajos de investigación de acuerdo a nuevas versiones de la normativa de clasificación o la clasificación de acuerdo a normativas de otros países.

7.2. Rendimiento de la clasificación visual

La clasificación de la muestra de acuerdo con la norma UNE 56544:2011 da lugar a un rendimiento de madera de calidad MEG de un 17 % en el caso de que la clase resistente pretendida fuera mayor que la C18. Este rendimiento sube al 53 % cuando la clase resistente a asignar fuera menor o igual a la C18. Los rechazos del 73 y del 47 % resultantes respectivamente son muy elevados. El perfil de propiedades físico-mecánicas relevantes (resistencia característica a flexión en N/mm^2 , modulo de elasticidad medio en N/mm^2 y densidad característica en kg/m^3) es de 28-10279-425 y 28-9921-448, respectivamente. Puede observarse que las diferencias son mínimas.

En la muestra objeto del estudio de sección 80x120 mm la clasificación como si fuera madera de pequeña escuadría da rendimientos y resultados peores; sólo existe un 3 % de calidad ME-1 y el rechazo es del 55 %. Puede concluirse que en este caso la barrera entre la pequeña y gran escuadría (anchura mayor que 70 mm para la gran escuadría) es acertada.

La causa principal del rechazo es el defecto del alabeo. El 64 % de las piezas para clase resistente pretendida mayor que C18 y el 39 % de las piezas para clase resistente pretendida menor o igual que C18, son rechazadas por alabeo. Si el defecto de alabeo no se considerara en la clasificación el rechazo desciende al 23 % y el perfil resistente sería de 22-9275-413. Se observa que la resistencia a flexión disminuye notablemente y ello es debido a la mayor presencia de madera juvenil (o al menos madera con anillos de crecimiento iniciales muy grandes).

En trabajos experimentales anteriores sobre esta misma especie (Íñiguez 2007) sobre un total de 150 piezas de dos escuadrías (150x200 y 150x250 mm) para una calidad MEG (con las especificaciones para clase resistente pretendida menor o igual a C18) se obtuvo un perfil de propiedades de 15-8893-482 con un rechazo del 17 %. En estas muestras el porcentaje de piezas rechazadas debido a las deformaciones era despreciable (0,6 %), posiblemente debido al hecho de que la escuadría era muy superior y por tanto, el efecto de la madera juvenil queda muy reducido. La resistencia, sin embargo, era notablemente menor. De lo anterior puede concluirse que el efecto del defecto de deformaciones (principalmente el alabeo) está más presente en la escuadrías menores (80x120) y en las mayores (150x200 y superiores) apenas incide.

La nudosidad de la muestra estudiada medida a través del índice CKDR alcanza un valor medio de 0,32, muy similar al de las muestras procedentes del País Vasco de 0,31 (Íñiguez 2007).

7.3. Estimación de la densidad

Densidad de la muestra:

Se considera como valor más representativo de la densidad de la madera el obtenido de una rebanada completa de la sección de la pieza según norma EN 408 (densidad local). Se trata de la densidad de una parte de la pieza carente de singularidades locales como pueden ser los nudos o las bolsas de resina que pueden enmascarar el valor real. En cualquier caso existe una elevada relación entre la densidad local y la densidad global de la pieza ($R^2 = 0,90$).

La densidad local media de la muestra estudiada es de 501 kg/m^3 valor que resulta algo superior al valor medio de la muestra procedente del País Vasco de 484 kg/m^3 (Íñiguez 2007).

Estimación de la densidad:

De los tres métodos analizados para la estimación de la densidad local, el que ofrece una mayor predicción es el de la extracción de testigos ($R^2 = 0,88$), seguido del arranque de tornillo ($R^2 = 0,53$) y finalmente el penetrómetro ($R^2 = 0,31$).

En trabajos experimentales anteriores sobre esta misma especie (Íñiguez 2007) sobre un total de 150 piezas de dos escuadrías (150x200 y 150x250 mm) los coeficientes de determinación obtenidos para el método de arranque de tornillo y de penetrómetro eran de 0,64 y 0,59, respectivamente. Se observa, en la muestra estudiada (escuadría más reducida que en los trabajos anteriores), que los coeficientes de determinación son inferiores, lo que puede deberse a una mayor influencia de la madera juvenil o a la de los primeros anillos de crecimiento.

7.4. Estimación del módulo de elasticidad

Módulo de elasticidad de la muestra:

El módulo de elasticidad global de la muestra completa presenta un valor medio de 8952 N/mm^2 que es del mismo orden que los valores de muestras procedentes del País Vasco (Íñiguez 2007). En el trabajo citado se obtuvieron valores de 8111 y 9968 N/mm^2 para escuadrías de 150x200 y 150x250 mm, respectivamente.

En una submuestra de 33 piezas (véase anexo 2) analizada en este trabajo se determinó el módulo de elasticidad local, además del global. El valor del módulo local era de 9781 N/mm^2 y el global de 9197 N/mm^2 . Además se determinó el módulo de elasticidad transversal o de cortante (G) obteniendo el valor medio de 446 N/mm^2 . La relación entre el módulo local y el transversal es de 21,9 (este valor se como término medio en coníferas igual a 16) pero presenta fuertes variaciones.

Estimación del módulo de elasticidad:

Se han utilizado cuatro procedimientos para la estimación del módulo de elasticidad. Los dos primeros a través de la determinación de la velocidad de transmisión acústica (ultrasonidos y onda de impacto). El tercero a través de la determinación de la velocidad de transmisión del sonido mediante el análisis dinámico de vibración longitudinal (a partir de la frecuencia propia de vibración). En estos tres métodos se determina posteriormente el módulo de elasticidad dinámico al introducir la densidad (local) de la madera. Y finalmente, el cuarto método consiste en la determinación de la frecuencia propia de vibración transversal de la que se deduce directamente el módulo de elasticidad dinámico.

El valor del módulo de elasticidad dinámico resulta superior al valor estático determinado en los ensayos mecánicos y se establece una relación entre ambos que permite la estimación del módulo estático. El módulo de elasticidad dinámico obtenido por vibración longitudinal es el más cercano al estático (11 % superior); a continuación se encuentra el obtenido por vibración transversal (12 % superior); después el obtenido mediante la velocidad de onda de impacto (26 % superior) y finalmente el obtenido a través de la velocidad de ultrasonidos (40 % superior).

En trabajos anteriores (Íñiguez 2007) en madera procedente del País Vasco el módulo dinámico obtenido por vibración longitudinal resultaba un 26 % superior al estático y el obtenido a través de la velocidad de ultrasonidos resultaba un 44 %. Estas relaciones son muy similares a las obtenidas en este trabajo.

El módulo de elasticidad estático (global) se puede estimar a partir del módulo dinámico con elevados coeficientes de determinación que ordenados de mayor a menor son los siguientes: 0,86 (vibración transversal), 0,85 (vibración longitudinal), 0,82 (ultrasonidos) y 0,78 (onda de impacto).

De acuerdo con lo anterior los métodos que mejor predicen el módulo de elasticidad del material son los de vibración. Sin embargo, estos métodos exigen que la pieza se encuentre en condiciones de apoyos libres y con condiciones especiales, lo que en la práctica impide su aplicación en piezas de madera puesta en obra. Únicamente serían aplicables en el caso de que las piezas se fueran a desmontar y volver a colocar. No obstante, los métodos basados en la determinación de la velocidad de transmisión de ondas, alcanzan una predicción ligeramente menor, pero aceptable.

7.5. Estimación de la tensión de rotura

Tensión de rotura de la muestra:

La tensión de rotura de la muestra ensayada presenta un valor medio de 42,95 N/mm² y un valor característico de 18,67 N/mm². Estos valores son superiores a los obtenidos con muestras procedentes del País Vasco (Íñiguez 2007) con valores de 26,50 y 15,46 N/mm²,

respectivamente. Se trata, pues, de una madera de mayor calidad estructural ya que presenta mayor densidad con una nudosidad similar, pero con valores de resistencia superiores.

Estimación de la tensión de rotura:

La estimación de la tensión de rotura puede hacerse mediante tres procedimientos:

El primero y más simple, a partir de la velocidad de transmisión de las ondas directamente que arroja coeficientes de determinación muy bajos (0,25 a 0,31). Estos valores son claramente inferiores a los obtenidos en trabajos anteriores (Íñiguez 2007) que en madera procedente del País Vasco alcanzaban valores de 0,50 a 0,53.

El segundo, a partir del módulo de elasticidad dinámico con coeficientes de determinación de 0,40 a 0,50. También resultan inferiores a los obtenidos para la procedencia del País Vasco (0,60 a 0,65).

Y finalmente, a partir del módulo de elasticidad dinámico pero añadiendo como otra variable la nudosidad (CKDR), donde se mejora la predicción con valores del coeficiente de determinación de 0,46 a 0,54. Otra vez, estos valores son inferiores a los obtenidos para la procedencia del País Vasco (0,66 a 0,68).

Por tanto, la resistencia a flexión en esta muestra ha resultado menos predecible que en trabajos anteriores con otras procedencias y escuadrías. Es posible que en escuadrías menores la predicción sea más baja.

7.6. Futuras líneas de investigación

Una vez terminada la tesis está previsto continuar con distintas líneas de trabajo comenzadas en esta tesis, especialmente los ensayos no destructivos o medianamente destructivos relacionados con la diagnosis de estructuras existentes.

Probetas testigo:

Está previsto continuar trabajando con probetas testigo, para determinar la densidad de la madera, reduciendo el diámetro de la probeta para minimizar el impacto del ensayo sobre los elementos estudiados, buscando el compromiso entre diámetro de la corona y fiabilidad de los datos obtenidos.

Las probetas utilizadas en la tesis se realizaron con coronas de 22 mm de diámetro. Actualmente ya se está trabajando con coronas de 14 mm de diámetro. Y se continuará reduciendo el diámetro mientras los valores obtenidos sean suficientemente precisos y fiables.

Resistógrafo:

Se han realizado trabajos sobre 50 de las 150 probetas-vigas estudiadas en la tesis. Los resultados obtenidos no se consideraron con la validez suficiente para presentarlos en este trabajo, en el área de la clasificación de madera nueva. Seguramente su utilización para

determinar propiedades físicas o mecánicas en madera nueva no resulta muy adecuada pero sí en madera puesta en obra. Existen numerosos trabajos publicados sobre ello. Creemos que dada la dependencia de los valores obtenidos con el resistógrafo con relación a la dirección de penetración de la broca, la vía de trabajo estará orientada a realizar un número de taladros suficiente para intentar garantizar que sobre una misma sección se realicen perforaciones al menos una radial, una tangencial y una que incluya las dos direcciones.

Esclerómetro:

Existen algunos equipos trabajando con esta herramienta proveniente del campo del hormigón. Principalmente trabajan en la búsqueda de valores de dureza superficial.

Los datos obtenidos en nuestra investigación no fueron muy interesantes por una inadecuada sujeción de las probetas a la hora de realizar los ensayos.

Se mejorará este aspecto y se intentará ver si es posible obtener buenas relaciones de los resultados de estas pruebas con la densidad de las muestras.

Base de datos gráfico-numérica:

Por último se está trabajando con la base de datos gráfico-numérica de la tesis para volver a clasificar las 150 piezas pero con las limitaciones que tendrían en caso de estar colocadas en obra y si solo fuesen visibles la cara inferior de cada pieza y la mitad de las dos laterales. Solo se tendrán en cuenta las particularidades y defectos observables en dichas zonas. De momento la parte más difícil de este trabajo es la valoración de las deformaciones geométricas, causantes de la mayor parte de los rechazos de las mismas, y que en las condiciones en las que se intentan reproducir resultan muy complicadas de utilizar. La idea es optar por dos vías, la primera es no tenerlas en cuenta y la segunda intentar medirlas con las limitaciones de la situación que se intenta reproducir.

BIBLIOGRAFÍA

Acuña, L. [et al.]. Clasificación de madera estructural de P. Pinaster Ait. mediante ultrasonidos. En: *3º Congreso Iberoamericano de productos forestales (Madereros y No Madereros) IBEROMADERA. Buenos Aires, Argentina 2007.*

Álvarez, L.; Basterra, A.; Casado, M.; Acuña, L. Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera. En: *I Jornadas de Investigación en Construcción.* Madrid: IETcc CSIC, 2005.

Apiloaza, L. A. Multiple trait improvement of Radiata Pine. Tesis doctoral, Massey University. Palmerston north. New Zealand, 2000.

Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M. *Productos de madera para la construcción : documento de aplicación del CTE.* Madrid : Confemadera, 2009, 78p.

Arriaga, F.; Peraza Sánchez, F.; García Esteban, L. Characteristic values of the mechanical properties of radiata pine plywood and the derivation of basic values of the layers for a calculation method. *Biosystems Engineering*, 2008, vol. 99, no. 2, pp. 256-266.

Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M.; Bobadilla, I. Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades. *Informes de la construcción*, 2007a, vol. 59, no. 506, pp. 29-41.

Arriaga, F.; Esteban, M.; Arguelles, R.; Boadilla, I.; Íñiguez, G. Efecto de las gemas en la resistencia a flexión de piezas enterizas de madera. *Materiales de construcción*, 2007b, vol. 57, no. 288, pp. 61-76.

Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Fernández-Golfin, J.I.; Esteban, M. Aplicación de la técnica de ultrasonidos en la clasificación de la madera de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) en piezas de gran escuadría para uso estructural. En : *Actas de las I Jornadas de Investigación en Construcción.* Madrid: IETcc CSIC, 2005a, pp. 403 - 415.

Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M. Assessment of strength and stiffness properties using longitudinal stress wave on structural gross cross section timber of Radiata Pine (*Pinus Radiata* D. Don). En : *Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 2005*, pp. 101-110 .

Bacher, M. Comparison of different machine strength grading principles. En : *Conference COST E53, 29-30 October 2008, Delft, The Netherlands.*

Ballarin, A.W.; Nogueira, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. *Engenharia Agrícola*, 2005, vol. 25, no. 1, pp. 19-28.

Baño, V.; Santos, J. C.; Vivas, J.; Rodríguez, S.; Vega, A.; Crews, K. A study of the influence of different types of timber footbridges on the vibration natural frequency. En: *WoodNDT2011 Sopron Hungary, 2011*.

Barrett, J.D.; Lau, W. *Canadian lumber properties*. Ottawa : Canadian Wood Council, 1994.

Barrett, J.D.; Fewell, A.R. Size factors for the bending and tensions strength of structural timber. En: *Proceedings of CIB-W18. Paper 23-10-3. Lisbon, Portugal. September, 1990*.

Barrett, J.D. Effect of size on tension perpendicular to grain strength of Douglas fir. *Wood and fibre Science*, 1974, vol.6, no. 2. pp. 126 - 143.

Basterra, A.; Casado, M.; Acuña, L.; Pinazo, O. Técnicas de ensayo pseudo no destructivas en madera estructural existente mediante extracción de tornillos. *Revista ReCoPaR*, 2006, no. 2, pp. 37-59.

Beall, F. C. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology*, 2002, no. 36, pp. 197–212.

Bengtsson, D. Grading Structural Timber. En: *COST E53 International Workshop on State of the Art in Quality Control. Sopron, Hungary 8 - 10 Nov. 2006*.

Bethge, K.; Mattheck, C.; Hunger, E. Equipment for detection and evaluation of incipient decay in trees. *Arboricultural Journal* , 1996, no. 20, pp. 13-37.

Bobadilla, I.; Íñiguez, G.; Arriaga, F. Técnicas no destructivas en la madera I: El penetrómetro. *Boletín de información técnica AITIM*, 2009, no 260, pp. 66-71.

Bobadilla, I.; Esteban, M.; Íñiguez, G. Arriaga, F., y Ballarín, D. Palacios, J. Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del modulo de elasticidad. *Informes de la construcción* , 2007, vol. 59, no, 506, pp. 107-116.

Bohannon, B. *Effect of size on bending strength of wood members*. Madison, WI: USDA Forest Service. Forest Products Laboratory, 1966. Research Paper. FPL 56

Brancheriau, L.; Bailleres, H. Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. *Wood Science and Technology* , 2006, no 36, pp. 47-365

Brashaw B. [et al.]. *Development of flexural vibration inspection techniques to rapidly assess the structural health of rural bridge systems : final report*. Minneapolis, Minnesota : ITS Institute , Natural Resources Institute, University of Minnesota, 2008. [Consulta: marzo 2012]. Disponible en : http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2009/fpl_2009_brashaw002.pdf

Brashaw, B.; Vatalaro, R.; Wacker, J.; Ross, R. *Condition assessment of timber bridges: 1. Evaluation of micro-drilling resistance tool*. Kennesaw, Georgia: Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory, 2005a.

Brashaw, B.; Vatalaro, R.; Wacker, J.; Ross, R. *Condition assessment of timber bridges: 2. Evaluation of several stress-wave tools*. Kennesaw, Georgia: Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory, 2005b. 11 p.

Bucur, V. *Acoustics of Wood*. 2nd ed. Berlin, New York: Springer, 2010. ISBN 3540261230, 9783540261230.

Bucur, V.; Böhnke, I. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. *Ultrasonics*, 1994, vol.32, no. 5, pp. 385 - 390.

Bucur, V.; Feeney, F. Attenuation of ultrasound in solid wood. *Ultrasonics*, 1992, vol. 30, no. 2, pp. 76 - 81.

Burdon, R.D.; [et al.]. Juvenile versus mature wood: a new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus Radiata* and *P. Taeda*. *Forest Science*, 2004, vol. 50, no. 4, pp. 399-415.

Calderoni, C.; [et al.]. Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements. *Engineering Structures*, 2010, no. 32, pp. 442-448.

Canga Libano, E. *Crecimiento y producción de pinares regulares de Pinus Radiata D. Don en Asturias*. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 2008.

Carballo, J.; Hermoso Prieto, E.; Fernández-Golfin, J.I. Evaluación de técnicas vibratorias en la clasificación de la madera aserrada de pino radiata destinada a fines estructurales. En : *11º Congreso Español de END, Gijón, 4-6 julio 2007*. p 305-315.

Casado, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; Basterra, A. [et al.]. The influence of size in predicting the elastic modulus of *Populus x euroamericana* timber using vibration techniques En : *Structures and Architecture*. London: Taylor & Francis Group, 2010. pp. 2026-2032.

Casado, M.; Acuña, L.; [et al.]. Clasificación estructural de la madera de *Populus X Euramericana* I-214. En : *V Congreso Nacional y II Congreso Ibérico AGROINGENIERÍA 2009. Lugo*

Casado, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; Basterra, A. I. Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de *Pinus sylvestris* mediante PLG. En: *11 Congreso español de END. Gijón, 2007*

Ceccotti, A.; Togni, M. NDT on ancient timber beams: Assessment of strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods En: *Proceedings 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Lausanne, Switzerland. 26 - 28 August 1996*. pp. 379 - 388.

Chauchard, L. M. *Crecimiento y producción de repoblaciones de Pinus Radiata D. Don en la provincia de Guipúzcoa (País Vasco)* Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. U. P. M. Madrid, 2000.

Choi, F. C.; Li, J.; Samali, B.; Crews, K. An Experimental study on damage detection of structures using a timber beam. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2007, no. 21, pp. 903-907.

Collardet, J.; Besset, J. *Les bois commerciaux :les résineux (conifères). Tome I*. Paris : Editions H. Vial & Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 1988.

Conde, M. Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. *Materiales de construcción*, 2007, vol 57, no. 288, pp. 49-59.

Costello, L. R.; Quarles, S. L. Detection of wood decay in blue gum and elm: an evaluation of the resistograph® and the and the portable drill. *Journal of Arboriculture* , 1999, vol 25, no. 6.

Cown, D. J.; Hebert, J.; Ball, R. Modelling *Pinus Radiata* lumber characteristics. Part 1: Mechanical properties of small clears. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1999, vol. 29, no. 2, pp. 203-213.

Cown, D.J. Use of the Pilodyn wood tester for estimating wood density in standing trees :Influence of site and tree age. New Zealand: Forestry Service. , 1982 FRI. Bulletin 13.

Cown, D. Comparison of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. *New Zealand Journal of Forest Science*, 1978, vol. 8, no. 3, pp. 384-391.

Crecente-Campo, F. Modelo de crecimiento individual para *Pinus Radiata* D. Don en Galicia. Tesis Doctoral, Escola Politécnica Superior, Lugo, Universidade de Santiago de Compostela, 2008.

Crews, K.I.; Samali, B.; Bakoss, S. L.; Champion, C. Overview of assessing the load carrying capacity of timber bridges using dynamic methods. En: *Austroads 5th. Bridge Conference, May 2004, Hobart, Australia*.

Crews K.I.; Samali B.; Li J. Reliable assessment of aged timber bridges using dynamic methods. En : *8th World Conference on Timber Engineering, June 14 -17 2004, Lahti, Finland*, pp. 295-300.

Denzler, J. K.; P. Glos, P. Determination of shear strength values according to EN 408. *Materials and Structures* , 2006, vol. 40, no. 1, pp. 79-86.

Dickson R.L., [et al.]. Acoustic Segregation of *Pinus Radiata* logs for sawmilling. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2004, vol. 34, no. 2, pp. 175-189

Divos, F.; Sismándy, F. Evaluation of historical wooden structures using non-destructive methods. En : *SHATIS'11 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures - Lisbon, Portugal, 2011a*

Divos, F. Portable Lumber Grader: Software and hardware guide. Versión 2.0 Fakopp Enterprise. [consulta: 1 de febrero de 2011b]. Disponible en : http://www.fakopp.com/site/download/PLG_Guide.pdf.

Divos, F. Portable lumber grader. En : *Proceedings of the 13th International Symposium on Non-destructive Testing of Wood. Berkeley, California, USA. 19 - 21 August 2002*. Published by Forest Products Society, 2003.

Divos, F.; Tanaka, T. Lumber Strength Estimation by Multiple Regression. *Holzforschung*, 1997, vol. 51, no. 5, pp. 467-471.

Divos, F. Screw withdrawal force as a strength predictor. En: *Proceedings of the 1st European Symposium on Non-destructive Evaluation of Wood. Sopron, Hungary, 21 - 23 September 1994*.

Downes, G.M., [et al.]. Relationship between wood density, micro fibril angle and stiffness in thinned and fertilized Pinus Radiata. *IAWA Journal*, 2002, vol. 23, no. 3, pp. 253-265.

Emerson, R.,; Pollock, D.; McLean, D.; Fridley, K., ; Pellerin, R.,; Ross, R. Ultrasonic inspection of large bridge timbers. *Forest Products Journal*. 2002, vol 52, no. 52, pp. 89-95.

Esteban, M., Arriaga, F., Íñiguez, G., Bobadilla, I. y Mateo, R. 2010. Influencia de las fendas en la resistencia de la madera estructural. *Materiales de Construcción*, 2010, vol. 60, no. 299, pp.115-132.

Esteban, M.; Arriaga, F.; Íñiguez, G., Modelling structural pathologies in King trusses. World Conference on Timber Engineering. (WCTE 2006), Portland, Oregón.

Esteban, M. Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación a las estructuras existentes de madera de conífera. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 2003.

Feio, A.O.; Machado, J.; Lourencço, P.B. Compressive behaviour and NDT correlations for chestnut wood En: *Proceedings of the 4th International Seminar "Structural analysis of historical constructions"*, Padova, Italy, 10-13 November 2004.

Feio, A.O.; Machado, J.S.; Lourenco, P.B. Parallel to the Grain Behaviour and NDT Correlations for Chestnut Wood (Castanea Sativa Mill). En: *Proceedings Conservation of Historic Wooden Structures. Florence, Italy, 2005*: pp. 294-303.

Fernández-Golfín, J.I.; Conde, M, Hermoso, E.; Carballo, J. Madera de pino radiata: conclusiones tras 25 años de trabajos. *Boletín de información técnica de AITIM*, 2008, no. 252, pp. 30-36.

Fernández-Golfín, J.I.; Hermoso, E, ; Díez-Barra, M.R. Análisis del efecto del volumen sobre la resistencia característica a flexión de la madera de los pinos silvestre y laricio de procedencia española. *Materiales de construcción*, 2002, Vol. 52. no 268, pp. 43-55.

Fernández-Golfín, J.I.; Díez-Barra, M.R., Hermoso, E. Análisis y estado del arte de clasificación mecánica de la madera aserrada estructural (Revisión). *Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales*, 2001, vol. 10, no. 1., pp. 5-19.

Fernández-Golfín, J.I.; Díez Barra M. R.; Gutiérrez Oliva A. Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56544. *Materiales de construcción*, 1998, vol. 48, no. 252, pp. 45-59.

Fernández-Golfín Seco, J.I. *Manual de usuario del Pino Insignis del País Vasco*. Madrid: Centro Técnico de la Madera, 1996a.

Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R. Growth rate as a predictor of density and mechanical quality of sawn timber from fast growing species. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 1996b, no. 54, pp. 171 - 174.

Fernández-Golfín, J.I. Influencia de la anchura del anillo de crecimiento y otras propiedades físico-mecánicas de la madera estructural de diversas especies. *Forest systems*, 1994, vol. 3, no. 2, pp. 211-219.[consulta: marzo 2012]. Disponible en:
<http://granat.boumort.cesca.es/index.php/IA/article/view/4779>

Freas, A.D.; Selbo, M.L. Fabrication and design of glued laminated wood structural members. Wisconsin: USDA , 1954. *Technical Bulletin*, 1069.

González Avila, R. A. Modelamiento de la arquitectura de nudos de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) a partir de variables externas e imágenes obtenidas con M.R.I. Proyecto para optar al título de Ingeniero Forestal. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, 2005.

Graff, K.F. *Wave motion in elastic solids*. New York : Dover Publications, 1991.

Greaves, B.; Borralho, N.; Raymond, C.; Farrington, A. Use of a Pilodyn for the Indirect Selection of Basic Density in *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, vol. 26, no. 9, pp. 1643-1650.

Hanhijärvi, A.; Ranta-Maunus, A.; Turk, G. *Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques: report of the Combigrade-project . phase 1*. Finland: VTT publications, 2008a.

Hanhijärvi, A.; Ranta-Maunus, A. *Development of strength grading of timber using combined measurement techniques : report of the Combigrade-project. phase 2*. Finland: VTT publications, 2008b.

Hanhijärvi, A.; Ranta-Maunus, A., ; Turk, G. 2005. *Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. Report of the Combigrade-project phase 1*. Espoo. Finland. VTT Publications, 2005.

Hearmon, R.F.S. Theory of the vibration testing of wood. *Forest Products Journal*, 1996, vol. 16 , no. 8, pp. 29 - 40.

Hermoso, E.; Carballo, J.; Fernández-Golfin, J.I., . Structural Characterization of *Pinus Radiata* D. Don Timber from Pais Vasco (Spain) According to Standard Modifications. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 2007a, vol. 9, no. 3, pp. 223-232.

Hermoso Prieto, E.; Carballo Collar, J.; Fernández-Golfin Seco, J.L. Revisión de la caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del norte de España acorde a las modificaciones normativas. En: *II Congreso Iberoamericano de investigación y desarrollo de productos forestales* , 2007b, pp. 1-10.

Hermoso, E.; Fernández-Golfin, J.L.; Díez Barra, R.; Mier Pérez, R. Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro. *Informes de la Construcción*. 2007c, vol. 59, no. 506, pp. 87-95.

Hermoso, E.; Fernández-Golfin, J.L.; Díez Barra, R. Mechanical characterization of timber according to European standards from Spanish provenances of Scots Pine. *Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales*, 2003a, vol. 12 , no 3, pp. 103-110.

Hermoso, E.; Fernández-Golfin, J.I.; Díez, M.R. Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos. En: *Actas del 10º Congreso Nacional END. Asociación Española de Ensayos No Destructivos. Cartagena. 18 - 20 Junio 2003b*.

Hermoso, E.; Fernández-Golfin, J.L.; Díez Barra, R. Análisis del factor de altura Kh.en la madera aserrada estructural de pino Silvestre. *Investigación Agraria*, 2002, vol. 11, no. 2, pp. 441-448.

Hermoso, E. Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Montes, 2001.

Hoffemeyer P. The Pilodyn Instrument as a Non-Destructive Tester of the Shock Resistance of Wood. En : *Non-Destructive Testing Meeting in Vancouver, Wa., Aug. 1978*, pp. 47-66.

Hoyle, R. J. A. A non destructive test for stiffness of structural lumber. *Forest Products Journal*, 1961, vol. 2, no. 6, pp. 251 - 254.

Iñiguez, G. [et al.]. Mechanical properties assessment of structural coniferous timber by means of parallel and perpendicular to the grain wave velocity. En: *Proceedings of the 16th International Symposium on Non-destructive Testing of Woo, Beijing, China, 2009*, pp. 79-84.

Iñiguez,G.; Arriaga, F.; Bobadilla, I.; Esteban, M., R. Grading by non-destructive techniques and assessment of the mechanical properties of large cross section coniferous sawn timber for structural use. En: *Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan, 2008*. pp. 1-8.

Iñiguez, G. *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadria para uso estructural*. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Tesis Doctoral. 2007a.

Iñiguez, G.; Arriaga, F.; Esteban, M.; Argüelles, R. Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Informes de la Construcción*. 2007b, vol. 59, no. 506, pp. 97-105

Iñiguez, G.; Arriaga, F.; Fernández-Golfin, J.I.; Díez, M.R.; Hermoso, E.; Mier, R. Clasificación visual de la madera de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) en piezas de gran escuadría para uso estructural. En: *Actas del 4º Congreso Forestal Español, Zaragoza, España. 26 - 30 Septiembre 2005*, pp. 413-425.

Isik, F.; LI, B. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. *Canadian journal of forest research*, 2003, vol. 33, no. 12, pp. 2426-2435.

Ivkovic, M. [et al.]. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. *Wood science and technology*, 2009, vol. 43, no. 3-4, pp. 237-257 .

Jayne, B.A. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest products journal*, 1959, vol. 9, no. 11, pp. 413 - 416.

Jayne, B.A. A non-destructive test of glue bond quality. *Forest products journal*, 1955, no.8, pp. 294 - 301

Johnstone, D.M.; Ades, P.K.; Moore, G.M.; Smith, I.W. Predicting wood decay in eucalypts using an expert system and the IML-Resistograph Drill. *Agriculture & Urban Forestry* , 2007, vol. 33, no. 2, pp. 76-82.

Karsulovic, J. T.; León, L. A.; Gaete, L. Ultrasonic detection of knots and annual ring orientation in *Pinus radiata* lumber *Wood and Fibre Science*, 2000, vol. 32, no 3, pp. 278-286.

Kasal, B. State-of-the-art in in-situ evaluation of structural timber – some critical observations. En: *SHATIS'11 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures - Lisbon, Portugal - June 2011a*.

Kasal, B.; Tannert, T.(Eds). In Situ Assessment of Structural Timber: state of the art. Report of the RILEM. Dordrecht : Springer, 2011b. ISBN 978-94-007-0559-3.

Kasal, B.; R. Anthony. Advances in situ evaluation of timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*. , 2004, vol. 6, no. 2, pp. 94-103.

Kavir, M. F.; Schmoldt, D. L.; Schafer, M. E. Detection of defects in Red Oak deckboards by ultrasonic scanning. En : *4th International Conference on Image Processing and Scanning of Wood Mountain Lake Resort. Mountain Lake, Virginia USA, 2000*.

LEAR, G. C. Improving the Assessment of In Situ Timber Members with the Use of Non-destructive and Semi-Destructive Testing Techniques. Doctoral Thesis, North Carolina State University. Raleigh. 2005

Lopez, J.A. Ajuste preliminar del pilodyn 6j forest para estimar la densidad de la madera de *Eucalyptus grandis*. En: *6º Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas. U.N.N.E. Facultad de Ciencias Agrarias. Corrientes*, 1995, pp. 77-

Madsen, B. *Structural behaviour of timber*. North Vancouver : Timber Engineering, 1992.

Madsen, B.; Buchanan, A.I Size effects in timber explained by a modified Weakest-link theory. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1986, vol.13 , no 2, pp . 218 – 232.

Maeglin, R. R. Increment cores :how to collect, handle, and use them. Kennesaw, Georgia : Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory ,1979. General Technical Report; FPL 25

Malhotra, V.M.; Carino, N. J. *Handbook on non-destructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2003.

Mariño, R.; Fernández Rodríguez, M^a. E.; Fernández Rodríguez, C. Análisis comparativo de la densidad de la madera *Pinus Sylvestris* L. mediante la utilización del Resistógrafo. *Revista CIS-Madera*, 2002, no. 9, pp. 60-70.

Matheson, A.C.; Gapare, E, W.J.; Ilic, J.; Wu, H.X., Inheritance and Genetic Gain in Wood Stiffness in Radiata Pine Assessed Acoustically in Young Standing Trees. *Silvae Genetica*, 2008, vol. 57, no. 2, pp. 56-64.

Matheson, A. C. [et al.]. Acoustic Segregation of *Pinus Radiata* Logs According to Stiffness. *Annals of Forest Science*, 2002, vol. 59, no. 5-6, pp. 471-477.

Mendez Salazar, R.A. Aplicación de las ondas ultrasónicas para la detección del cilindro defectuoso central en árboles podados de *Pinus radiata* (D.Don). Tesina Universidad de Chile, 2003

Micko, M. M. [et al.]. Determination of the wood specific gravity in standing white spruce using a pilodyn tester. *The Forestry Chronicle*,. August 1982, pp.178-180.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal . "Datos en base al Mapa Forestal de España, MFE50" [correo electrónico]. 2012

Minster, J.; Drdácáký, M.; Jirovsky, I.; Kloiber, M.; Micka, M.; Slízková, Z.; Václavík. P. Diagnostic techniques to assess mechanical characteristics of historical timber. En: . *Heritage, Weathering and Conservation. HWC – Madrid*, 2006.

Moro, R. *Guía de los árboles de España*. Barcelona: Omega, 2002

Murphy, J.F. Transverse vibration of a simply supported beam with symmetric overhang of arbitrary length. *Journal of Testing and Evaluation*, 1997, vol. 25, no. 5, pp. 522 - 524.

Newling, J.A.; Trayer, G.W. *Form factor of beams subjected to transverse loading only*. Illinois: NACA, 1924. NACA report nº 181

Nocetti, M.; Bacher, M.; Brunetti, M.; Crivellaro, A.; Van de Kuilen J. Machine grading of Italian structural timber: preliminary results on different wood species. En : *World Conference on Timber Engineering. WCTE. Riva del Garda, Italy. 2010*

Notivol, E., Gil, L. A., Pardos, J. A. 1992. Una metodología para la estimación de la densidad de la madera en pie y de su grado de variabilidad en el Pinus Pinaster Ait. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 1992, vol. 1, no. 1, pp. 41-47.

O'Neil, H. Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos. 2005. [Consulta: 18 agosto 2011]. . Disponible en: <http://latu30.latu.org.uy>.

Oliveira, F. G. R.; Sales, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical Woods. *Bio resource Technology*, 2006, no. 97, pp. 2443–2446.

Palaia, L. [et al.]. Assessment of timber structures in service, by using combined methods of non-destructive testing together with traditional ones. En : *9th International Conference on NDT of Art, Jerusalem Israel, 2008*.

Pellerin, R.F. A vibrational approach to non-destructive testing of structural lumber, *Forest Products Journal*, 1965, vol. 15, no. 3, pp. 93-101.

Piazza, M.; Riggio, M. Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures. *Journal of Building Appraisal*, vol. 3, no. 4, pp. 267–296.

Rajeshwar, B.; Bender, D. A.; Bray, D. E.; McDonald, K.A. An Ultrasonic technique for predicting tensile strength of Southern Pine lumber. *Transactions of the ASAE*, 1997, vol. 40, núm. 4, pp. 1153-1159.

Ramón, G. Propuesta de metodología orientada al proyecto para la evaluación de estructuras de madera del patrimonio histórico. Tesis doctoral, E.T.S. de Arquitectura de Valladolid. Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de los medios Continuos y Teoría de Estructuras, 2007.

Ramón, G.; Basterra, A.; Casado, M.; Acuña, L. Análisis de las técnicas de diagnóstico de madera estructural en edificios existentes y propuesta de integración orientada al proyecto. En: *I Jornadas de Investigación en Construcción*. Madrid: IETcc CSIC, 2005.

Ranta-Maunus; A. Turk, G. Approach of dynamic production settings for machine strength grading. En: *11th World Conference on Timber Engineering: WCTE 2010*, Riva del Garda, Italy.

Raymond, C. A., MacDonald, A. C. Where to shoot your pilodyn: within tree variation in basic density in plantación *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. *New Forest*, 1998. 15: 205-221.

Rinn, F.; Scheingruber, F. and Schär, E. Resistograph and X-ray density charts of Wood: comparative evaluation of drill-Resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung: International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 1996a, vol. 50, no. 4, pp. 303–311.

Rinn F. Resistographic visualization of tree-ring density variations. *Radiocarbon: an international journal of cosmogenic isotope research*, 1996b, vol. 33, pp. 871-878.

Rinn, F. Resistographic inspection of building timber. En: *Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference*, Gold Coast, Australia. 11 - 15 July 1994, vol. 2, pp. 469 - 478.

Rodriguez, M. M. El Pino radiata (*Pinus radiata* D.Don) en la historia forestal de la Comunidad Autónoma del País Vasco: análisis de un proceso de forestalismo intenso. Tesis Doctoral, UPM, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 2003.

Rodríguez, C.; Rubio de Hita, P. *Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2000. 165 p.

Rodriguez, C.; Rubio de Hita, P.; Gómez, J. C. Application of ultrasonic techniques, as a non destructive method for the evaluation of timber structures. En: *Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering*, Montreaux, Switzerland, 17 - 20 August 1998, vol. 2, pp. 806 - 807.

Ross, R. J.; Brashaw, B. K.; Wang, X. Structural Condition Assessment of in-Service Wood. *Forest Products Journal*, 2006, vol. 56, no. 6, p. 4 – 8.

Ross, R. J.; Hunt, M. O. *Stress wave timing non-destructive evaluation tools for inspecting historic structures. A guide for use and interpretation*, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-119. Madison, Wi: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000, 15 p.

Ross, R. J.; Geske, E. A.; Larson, G. L.; Murphy, J. F. *Transverse vibration nondestructive testing using a personal computer*. Research Paper FPL-RP-502. Madison, Wi: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991, 17 p.

Ruiz de la Torre, J.; Ceballos, L. *Árboles y arbustos de la España peninsular*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 1971.

Sales, A. Comparison of nondestructive techniques to determine the modulus of elasticity of Brazilian lumber. En: *Proceedings of the 10th world conference on timber engineering*, Miyazaki, Japan, June 2-5, 2008. [S.l.]. : Engineered Wood Products Association (Ewpa), 2009.

Samali, B.; Li, J.; Crews, K.I.; Al-dawod, M. Load rating of impaired bridges using a dynamic method. *Electronic journal of Structural Engineering*, Special Issue: Loading on Structures, 2007, pp. 66 – 75.

Sandoz, J. L.; Yann, B. Timber grading machine using multivariate parameters based on ultrasonic and density measurement. A: The first conference quality control for wood and wood products: COST E 53. Warsaw: Warsaw University of Life Science. Faculty of Wood Technology, 2007, p. 167-173 [Consulta: 30 marzo 2012]. Disponible en: <http://www.coste53.net/downloads/Warsaw/Warsaw-presentation/COSTE53-ConferenceWarsaw-Presentation-Sandoz.pdf>

Sandoz, J. L. Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*, 1989, vol. 23, no. 1, pp. 95 - 108.

Santaclara, O.; Fernández, A.; Merlo, E.; Guaita, M. Técnicas no destructivas y ensayo mecánico en madera aserrada de gran escuadría de *Pseudotsuga menziesii*. En *V Congreso Nacional y II Congreso Ibérico AgroIngeniería*, 2009 Lugo.

Seoane, I.; Ortiz Gutiérrez., J. Características mecánicas de la madera de Pino Radiata: obtenidas a partir de ensayos con piezas de tamaño estructural: comparación entre distintas normas de clasificación. *Boletín de información técnica AITIM*, 1989, no. 136, pp. 66-71.

Smith, S. M.; Morrell, J. J. Correcting Pilodyn measurement of Douglas-fir for different moisture levels. *Forest Products Journal*, 1986, vol. 36 núm.1, p. 45-46.

Soriano, J.; Gonçalves, R.; Bertoldo, C.; Trinca, A.; Ruy, M. Applications of esclerometer test method in specimens of eucalyptus saligna. En: *17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. Sopron Hungary: Ference Divos, 2011, pp. 679-684. ISBN 978-963-9883-81-9.

Sunley, J. G., Curry, W. T. 1962. A machine to stress grade timber. NTI

Szilard, J. *Ultrasonic testing: non conventional testing techniques*. Chichester [Eng.]. ; New York : Wiley, c1982. ISBN 0471279382.

Tseng, Y. J.; Hsu, M. F. Application of Drill Resistance Method on Evaluating the Compressive Strength of Wooden Components. En: *Proceedings of the 8th International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs & Maintenance of buildings & Structures, Singapore*, 2008.

Tseng, Y. J., Hsu, M. F. 2003. Evaluating the Mechanical Properties of Wooden Components Using Drill Resistance Method. *J Wood Sci*, Vol. 49, 2003, pp. 116-124

Vignote, S. Características físico-mecánicas del pino insignis y su influencia con la edad y el crecimiento (Physical and mechanical properties of *Pinus insignis* and the influence of age and rate of grown). Doctoral Tesis. Universidad Politécnica de Madrid, ETS de Ingenieros de Montes. 1984. 293 pp.

Vignote, S. Características físico-mecánicas del pino insignis y su influencia con la edad y el crecimiento. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. de Montes, 1984. 293 p.

Wang, X. Effects of size and moisture on stress wave E-rating of structural lumber. En: *Proceedings of the 10th world conference on timber engineering, Miyazaki, Japan, June 2-5, 2008*. [S.l.] : Engineered Wood Products Association (Ewpa), 2009.

Wang, X.; Wacker, J. P.; Ross, R. J.; Brashaw, B. K. *Condition assessment of main structural members of steam schooner WAPAMA*. General Technical Report FPL-GTR-177. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2008. 29 p.

Wang, X.; Divos, F.; Pilon, C.; Brashaw, B.K.; Ross, R. J.; Pellerin, R. F. *Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools: a guide for use and interpretation*. General Technical Report FPL-GTR-147. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2004. 12 p.

Wang, X.; Ross, R. J., et al. *Stength ans stiffness assessemant of standing tress using a nondestructive stress wave technique*. General Technical Report FPL-GTR-147. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2004. 9 p.

Watt, M.S.; Garnett, B.T; J.C.F. Walker. The use of the pilodyn for assessing outerwood density in New Zealand radiata pine. *Forest Products Journal*, 1996, vol. 46, pp. 101-106.

Weaver, W.; Timoshenko S.P.; Young, D.H. *Vibration problems in engineering*. 5^a ed. New York : Wiley,1990. 610 p. ISBN 0471632287

Weibull, W. *A statistical theory of the strength of materials*. Handlingar NR 151. Stockholm: Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, 1931. 45 p.

Wilson, James B. Pole inspection using the pilodyn. En: *Proceedings of the 7th Wood Pole Institute*. Fort Collins, Colorado, 1981.

Wood, L.W. *Relation of strength of wood to duration of load: report 1916*. Wisconsin: Forest Products Laboratory Forest Service, US Department of Agriculture, 1951.

Wu, S. J. Use of the Pilodyn for assessing wood properties in standing trees of Eucalyptus clones. *Journal of forestry research*, 2010, vol. 21, no. 1, p. 68-72.

NORMAS

BS 4978:2007. *Visual strength grading of softwood - specification*. London: British Standards Institution.

DIN 4074 Teil 1 (sortiert als Kantholz) (graded as joist). Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit,- Teil 1: Nadelschnittholz, 2003.

INSTA 142:2009. *Nordic visual strength grading rules for timber*. Charlottenlund: Danks Standard, 2009, 68 p.

EN 14081-3:2005. *Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 3: Machine grading; additional requirements for factory production control*. Madrid: AENOR, 2005.

EN 14081-4:2009. *Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 4: Machine grading - Grading machine settings for machine controlled systems*. Madrid: AENOR, 2009.

NF B 52-001:2007 +A1:2009. *Règles d'utilisation du bois dans les constructions; Classement visuel pour emploi en structure pour les principales essences résineuses et feuillues*.

UNE 41805-1 IN: 2009. *Diagnóstico de edificios. Parte 1: Generalidades*. Madrid: AENOR, 2009.

UNE 41805-2 IN: 2009. *Diagnóstico de edificios. Parte 2: Estudios históricos*. Madrid: AENOR, 2009.

UNE 41805-3 IN: 2009. *Diagnóstico de edificios. Parte 3: Estudios constructivos y patológicos*. Madrid: AENOR, 2009.

UNE 41805-8 IN: 2009. *Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera*. Madrid: AENOR, 2009.

UNE 41805-9 IN: 2009. *Diagnóstico de edificios. Parte 9: Estudio patológico del edificio. Cubiertas*. Madrid: AENOR, 2009.

UNE 41805-14 IN: 2010. *Diagnóstico de edificios. Parte 14: Informe del diagnóstico*. Madrid: AENOR, 2010.

UNE 56544:2007. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de coníferas*. Madrid: AENOR, 2007.

UNE 56546:2011. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de frondosas*. Madrid: AENOR, 2011.

UNE-EN 1309-1:1997. *Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las dimensiones. Parte 1: Madera aserrada*. Madrid: AENOR, 1997.

UNE-EN 13183-1:2002+AC2004. *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa*. Madrid: AENOR, 2004.

UNE-EN 13183-2:2002. *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica*. Madrid: AENOR, 2002.

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

UNE-EN 14081-1:2006+A1:2011. *Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales*. Madrid: AENOR, 2011.

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.* Madrid: AENOR, 2010.

EN 14081-3:2005. *Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 3: Machine grading; additional requirements for factory production control.* Madrid: AENOR, 2005.

EN 14081-4:2009. *Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 4: Machine grading - Grading machine settings for machine controlled systems.* Madrid: AENOR, 2009.

UNE-EN 1912:2005. *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.* Madrid: AENOR, 2005.

UNE EN 1995-1-1:2006. *Eurocódigo 5. Estructuras de Madera. Parte 1: Reglas generales y reglas para la edificación.* Madrid: AENOR, 2006.

UNE-EN 336:2003. *Madera estructural. Dimensiones y tolerancias.* Madrid: AENOR, 2003.

UNE-EN 338:2010. *Madera estructural. Clases resistentes.* Madrid: AENOR, 2010.

UNE-EN 384:2004. *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.* Madrid: AENOR, 2004.

UNE-EN 408:2004. *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.* Madrid: AENOR, 2004.

UNE-EN 408:2004 ERRATUM: 2009. *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.* Madrid: AENOR, 2009.

UNE-EN 408:2011. *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.* Madrid: AENOR, 2011.

UNI 11119: 2004. *Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici – Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera.* Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2004.

UNI 11138: 2004. *Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi.* Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2004.

UNI 11203: 2007. *Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Terminologia delle configurazioni strutturali e delle parti costituenti.* Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2007.

ANEXO 1:

CONSIDERACIONES SOBRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD GLOBAL Y LOCAL

A1.1 Objeto

La norma de ensayos UNE-EN 408 recoge dos procedimientos diferentes para la determinación del módulo de elasticidad en flexión. El primero es el denominado módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) calculado a partir de la flecha respecto a los apoyos; el segundo, denominado módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$), se obtiene a partir de la flecha en un tramo central de longitud igual a 5 veces el canto de la viga.

Las características de ambos valores pueden resumirse de la manera siguiente:

- Módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$):

Este módulo de elasticidad se obtiene a partir de la medición de la flecha de la viga con respecto a los apoyos. Su medición requiere instrumentos de medida de deformación con menor precisión que el local, debido a que las flechas son del orden de milímetros o centímetros. Es más “estable” al ser un valor representativo de toda la longitud de la pieza, y puede medir con un único comparador en la cara inferior de la sección central.

- Módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$):

Este módulo está libre del efecto del cortante, ya que mide la flecha en relación al vano central de longitud igual a 5 veces el canto de la viga; en este tramo el cortante es nulo. Requiere la utilización de dos comparadores colocando uno en cada cara lateral de la pieza para compensar los efectos de un posible giro de torsión

Presenta mayor variabilidad que el módulo global, ya que es representativo de un tramo de longitud relativamente corto.

La flecha medida en el ensayo del módulo global incluye la deformación debida al esfuerzo cortante.

La versión actual de la norma UNE-EN 408:2011 ha introducido la corrección del efecto del cortante en la expresión del módulo global, de tal forma que conocido el módulo de elasticidad transversal o de cortante (G) se obtiene el módulo de elasticidad global pero libre del efecto de cortante.

Recientemente se ha elaborado un borrador de enmienda, EN 408:2020 Fpr A2:2011, que propone una modificación de una parte de la norma que afecta al módulo de elasticidad (apartado 10.3) y que afecta al valor del módulo de elasticidad que se emplea para la asignación de la clase resistente según la norma UNE-EN 384.

En este anexo se exponen los procedimientos seguidos en este trabajo para la determinación de los módulos de elasticidad global, local y el valor a utilizar en la asignación de clases resistentes. Se hace referencia a las versiones 2003 y 2011 de la norma UNE-EN 408.

A1.2 Módulo de elasticidad global (UNE -EN 408:2003)

El módulo de elasticidad en flexión se ha determinado según la norma UNE-EN 408:2003 obteniendo en las 150 piezas el módulo de elasticidad global en flexión según la expresión:

$$E_{m,g} = \frac{l^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (\text{ec. A1.1})$$

donde

- $F_2 - F_1$ es el incremento de carga en el tramo recto de la curva de carga - deformación en N, figura 5.17.
- $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en mm, figura 5.17.
- b, h las dimensiones de la sección transversal de la pieza (ancho y canto), en mm.
- a distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en mm. En nuestro caso $a = l/3 = 720$ mm.
- l luz de la probeta, en mm. En nuestro caso $l = 18 h = 2160$ mm.

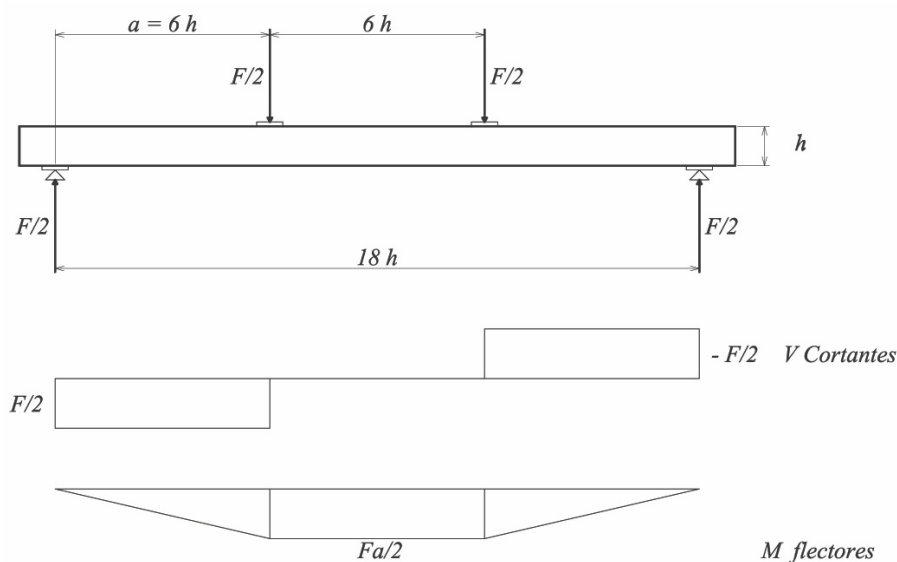


Figura A1.1. Disposición de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad global

La deformación se mide en el centro del vano con respecto a los apoyos, por lo que su valor depende de la ley de momentos flectores y también de la ley de esfuerzos cortantes. Por tanto, el valor obtenido incluye un efecto de los esfuerzos cortantes.

A1.3 Módulo de elasticidad local (UNE 408:2003 Y UNE 408:2011)

En 33 piezas de las 150 se determinó, además, el módulo de elasticidad local en flexión, también según la norma UNE-EN 408:2003, según la expresión:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (\text{ec. A1.2})$$

donde

$F_2 - F_1$ es el incremento de carga en N, en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o superior.

$w_2 - w_1$ es el incremento de deformación en mm correspondiente a $F_2 - F_1$, figura 5.17.

I momento de inercia de la sección ($bh^3/12$)

l_1 longitud base medida de medida, igual a $5h$, tomando $h=120$ mm, como valor nominal, figura x.

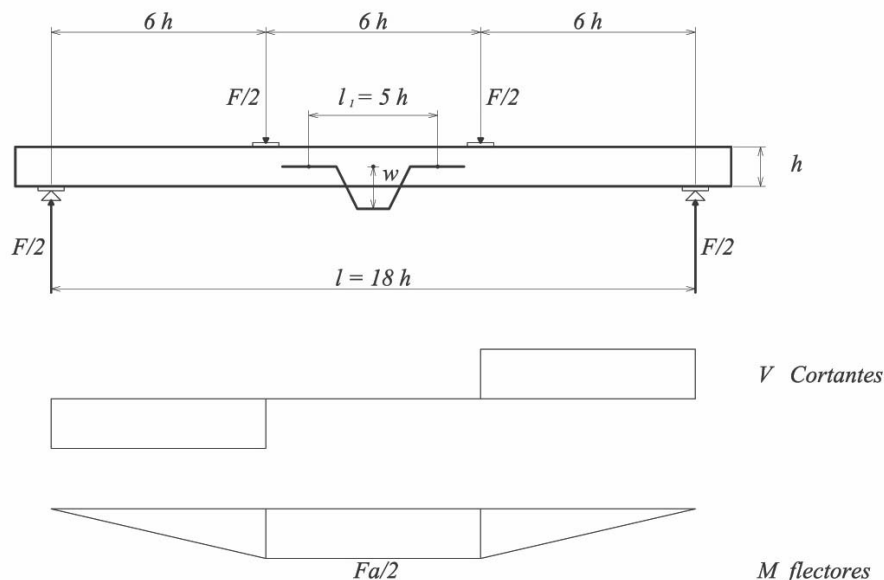


Figura A1.2. Disposición de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad local.

La deformación se mide en el tramo central de longitud $l_1=5h$, donde el cortante es nulo y el momento flector es constante. Esta deformación se mide en ambas caras de la pieza para minimizar errores de lectura debidos al giro de la sección. El valor del módulo obtenido, está libre del efecto cortante y será mayor al anterior, denominado global.

Los valores medios obtenidos para ambos módulos de elasticidad, referidos a un contenido de humedad del 12% son:

$$\begin{aligned} E_{m,g} &= 9.196,65 \text{ N/mm}^2 & CV &= 26,21\% \\ E_{m,l} &= 9.781,52 \text{ N/mm}^2 & CV &= 28,58\% \end{aligned}$$

Nota: En la base de datos se utiliza la notación E_{glo12} y E_{loc12} para $E_{m,g}$ y $E_{m,l}$, respectivamente.

Puede observarse como el valor de $E_{m,l}$ es algo mayor que el $E_{m,g}$, como era de esperar. El coeficiente de variación es también ligeramente mayor en el caso del módulo de elasticidad local, consecuencia de la mayor variabilidad que puede encontrarse en tramos de longitud 5h, frente a los tramos completos de longitud 18h.

A1.4 Estimación del módulo de elasticidad transversal G

La expresión de la flecha de una viga biapoyada con dos cargas puntuales de valor igual a $F/2$ situadas a los tercios de la luz es:

$$f = \frac{23}{1296} \frac{Fl^3}{EI} + \chi \frac{Fl}{6GA}$$

donde el primer sumando corresponde a la flecha debida al momento flector y el segundo debido al esfuerzo cortante. Y además,

χ	factor dependiente de la forma de la sección. En secciones rectangulares $\chi = 1,2$
G	módulo de elasticidad transversal o de cortante.
A	área de la sección (b x h)
I	momento de inercia de la sección ($bh^3/12$)

Si se saca factor común el primer sumando,

$$f = \frac{23}{1296} \cdot \frac{Fl^3}{EI} \left(1 + \frac{1296}{138} \cdot \frac{I}{A} \cdot \frac{\chi}{l^2} \cdot \frac{E}{G} \right) \quad (\text{ec. A1.3})$$

Sustituyendo $I = bh^3/12$, $A = bh$, $\chi = 1,2$ y $l/h = 18$

$$f = \frac{23}{1296} \cdot \frac{Fl^3}{EI} \left(1 + \frac{1}{345} \cdot \frac{E}{G} \right) \quad (\text{ec. A1.4})$$

En la ecuación anterior E sería el módulo de elasticidad libre de cortante, $E_{m,l}$. Y si el cálculo de la flecha se realiza considerando incluido el efecto del cortante a través del módulo de elasticidad global $E_{m,g}$,

$$f = \frac{23}{1296} \frac{Fl^3}{E_{m,g}I} \quad (\text{ec. A1.5})$$

Igualando ambas expresiones de la flecha,

$$\frac{23}{1296} \cdot \frac{Fl^3}{E_{m,g}I} = \frac{23}{1296} \cdot \frac{Fl^3}{E_{m,l}I} \left(1 + \frac{1}{345} \cdot \frac{E_{loc}}{G} \right) \quad (\text{ec. A1.6})$$

Se obtiene, el valor de G,

$$G = \frac{E_{m,l}}{345 \left(\frac{E_{m,l}}{E_{m,g}} - 1 \right)} = \frac{9781,52}{345 \left(\frac{9781,52}{9196,65} - 1 \right)} = 446 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{ec. A1.7})$$

Por tanto, de los 33 ensayos en los que se ha efectuado la determinación de ambos módulos ($E_{m,g}$ y $E_{m,l}$) se puede estimar que el valor de G para esta especie es 446 N/mm²

A1.5. Módulo de elasticidad global en flexión (UNE-EN 408:2011)

En la norma UNE-EN-408 en su última versión publicada por AENOR en 2011, el módulo de elasticidad global se determina siguiendo el mismo procedimiento que el definido en la versión de la norma de 2003, pero se modifica la expresión para su cálculo. En esta nueva expresión se incluye la corrección del efecto del cortante en la deformación, según la siguiente ecuación,

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5G \cdot b \cdot h} \right)} \quad (\text{ec. A1.8})$$

donde se introduce el valor del módulo de elasticidad G (o módulo de cortante), que permite obtener directamente el módulo de elasticidad $E_{m,g}$, libre de cortante. En este caso ya no sería necesaria la corrección que se especifica en la norma UNE-EN 384:2010, recogida en la ecuación A8.

La norma indica que si no se conoce el valor de G, puede tomarse igual a infinito. En ese caso, la expresión del $E_{m,g}$ queda idéntica a la del $E_{m,g}$ de la norma UNE-EN 408:2003; esto es equivalente a asignar la deformación producida por el esfuerzo cortante a la flexión, con un criterio conservador, ya que el valor obtenido para $E_{m,g}$ resultará ligeramente menor. En condiciones de ensayo normalizado ($l=18h$, $a=6h$, sección rectangular) y admitiendo una relación $E/G=16$, la influencia del cortante es 4,63%.

También la norma permite tomar, para las especies de coníferas, un valor del módulo de elasticidad transversal, $G=650 \text{ N/mm}^2$.

Aplicando la ecuación anterior (ec. A.9) a la muestra completa de 150 piezas se obtienen los valores del módulo de elasticidad global en flexión de la tabla A1.1

G (N/mm ²)	E _{m,g}	
	Medio (N/mm ²)	CV (%)
446	9509	25
650	9327	25
∞	8952	24

Tabla A1.1 Valores medios del módulo de elasticidad global corregido al 12% de contenido de humedad

De acuerdo con la enmienda (borrador) EN 408:2010/Fpr: 2011 se deberá tomar $G=\infty$ en la ecuación A.8, cuando sea utilizado para la asignación de clases resistentes según la norma UNE-EN 384.

A1.6. Valor medio del módulo de elasticidad de la muestra (UNE-EN 384:2010)

De acuerdo con la norma UNE-EN 384:2010 el valor medio del módulo de elasticidad de la muestra \bar{E} , se debe calcular mediante la siguiente ecuación que incluye una corrección para obtener el módulo de elasticidad libre de cortante,

$$\bar{E} = 1,3 \frac{\sum E_i}{n} - 2690 \quad (\text{ec. A1.9})$$

donde

E_i es el i -ésimo valor del módulo de elasticidad, desde 1 hasta n (en N/mm²)

Por tanto, el término $\frac{\sum E_i}{n}$ se corresponde con el valor medio del módulo de elasticidad global, que para las 33 probetas antes citadas es,

$$E_{m,g} = 8.952 \text{ N/mm}^2 \text{ Por tanto,}$$

$$\bar{E} = 1,3 \cdot 8.952 - 2690 = 8.948 \text{ N/mm}^2$$

Puede observarse, como el resultado $\bar{E}=8.948 \text{ N/mm}^2$ es inferior al valor del módulo de estabilidad local, $E_{m,l} = 9781 \text{ N/mm}^2$. La ecuación A.9 es discutida en el comité europeo de normalización y su origen o fundamento no es completamente claro.

Finalmente, a efectos de cálculo del módulo de elasticidad para su asignación a la clase resistente se ha seguido el procedimiento (tomando $G=\infty$)