



Universitat de Lleida

Caracterización mecánica del abeto (*Abies alba* Mill.) procedente de la cordillera pirenaica

Miguel Broto Cartagena

<http://hdl.handle.net/10803/384933>



*Caracterización mecánica del abeto (*Abies alba* Mill.) procedente de la cordillera pirenaica* està subjecte a una llicència de [Reconeixement-NoComercial-CompartirIgual 3.0 No adaptada de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)

(c) 2016, Miguel Broto Cartagena

UNIVERSIDAT DE LLEIDA
DEPARTAMENT D'ENGINYERIA AGROFORESTAL

TESIS DOCTORAL

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL ABETO (*Abies alba* Mill.) PROCEDENTE DE LA CORDILLERA PIRENAICA



MIGUEL BROTO CARTAGENA
Ingeniero de Montes

Director
FRANCISCO ARRIAGA MARTITEGUI
Dr. Arquitecto

Tutor
JOSÉ MARÍA IGLESIAS RODRÍGUEZ
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

2015

UNIVERSIDAT DE LLEIDA
Programa de Doctorat: Enginyeria Rural i Forestal

TESIS DOCTORAL

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL ABETO (*Abies alba* Mill.) PROCEDENTE DE LA CORDILLERA PIRENAICA

MIGUEL BROTO CARTAGENA
Ingeniero de Montes

Director
FRANCISCO ARRIAGA MARTITEGUI
Dr. Arquitecto

Tutor
JOSÉ MARÍA IGLESIAS RODRÍGUEZ
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

2015

Índice.....	I
Índice de tablas.....	III
Índice de figuras	V
Agradecimientos	1
Resum	2
Resumen	3
Summary	4
1. Introducción	5
2. Objetivos.....	9
3. Antecedentes.....	10
3.1 Abies Alba Mill. Descripción breve de la especie.....	10
3.2 Ámbito geográfico del estudio	13
3.3 Características físico-mecánicas en probetas libres de defectos.....	13
3.4 Caracterización de la madera. Madera libre de defectos y madera estructural ..	16
3.5 Madera estructural: pequeña y gran escuadría.....	23
3.6 Singularidades de las piezas de gran escuadría.....	25
3.7 Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera estructural. Clasificación	26
3.7.1 Clasificación visual.....	27
3.7.2 Otros métodos de clasificación	32
3.8 Asignación clase resistente	35
4. Métodos y equipos utilizados	39
4.1 Laboratorios de ensayo y equipo humano	39
4.2 Equipamiento principal de ensayos	39
4.3 Equipamiento auxiliar	41
5. Metodología	43
5.1 Material de ensayo	43
5.1.1 Probetas del Grupo A	45
5.1.2 Probetas del grupo B	47
5.1.3 Probetas del grupo C	47
5.2 Líneas generales del desarrollo experimental	47
5.2.1 Marcado de puntos principales	48
5.2.2 Registro de las singularidades de las probetas	49
5.2.3 Clasificación visual.....	50
5.2.4 Ensayos	54
5.3 Determinación de las propiedades mecánicas y elásticas	54

5.3.1 Módulo de elasticidad local	54
5.3.2 Tensión de rotura a flexión.....	58
5.4 Determinación de las propiedades físicas	58
5.4.1 Contenido de humedad.....	58
5.4.2 Densidad	59
6. Análisis y discusión de resultados.....	60
6.1 Eficiencia de la clasificación	60
6.1.1 Grupo A	61
6.1.2 Grupo B	62
6.1.3 Grupo C	63
6.2 Eficacia de la clasificación	63
6.2.1 Resultados ensayos Grupo A.....	64
6.2.2 Resultados ensayos Grupo B.....	66
6.2.3 Resultados ensayos Grupo C	66
6.2.4 Rechazos.....	67
6.2.5 Influencia del tamaño de la sección	67
6.3 Asignación de clase resistente	71
6.3.1 Reglas de asignación.....	71
6.3.2 Población española.....	72
6.3.3 Población Pirineos	74
6.3.4 Comparación población española vs población Pirineos.....	75
6.4 Evaluación de lotes incompletos	77
6.5 Evaluación de lotes aleatorios.....	79
7. Conclusiones y propuestas	81
7.1 Clasificación visual	81
7.2 Influencia del tamaño de la sección.....	82
7.3 Asignación de clase resistente	83
7.4 Uso de lotes incompletos y ficticios	84
7.5 Futuras líneas de investigación	85
Bibliografía.....	86
Anexos	110
Anexo 1. Resultados de ensayos	110
Anexo 2. Normas nacionales en Europa para la clasificación visual del abeto blanco	118

Tabla 3.1. Propiedades físicas de la madera de abeto	14
Tabla 3.2. Propiedades mecánicas de la madera de abeto	14
Tabla 3.3 Propiedades físico mecánicas por clase de edad	14
Tabla 3.4 Propiedades físicas por tipo de masa	15
Tabla 3.5 Propiedades mecánicas por tipo de masa	15
Tabla 3.6. Propiedades mecánicas de diversas procedencias.....	16
Tabla 3.7. Propiedades físicas	16
Tabla 3.8. Propiedades mecánicas	16
Tabla 3.9. Rendimiento de diferentes especies españolas de acuerdo a UNE 56544:2003 ...	30
Tabla 3.10. Rendimiento de diferentes especies españolas de acuerdo la clase MEG	30
Tabla 3.11 Rendimiento de diferentes normas para el abeto blanco.....	31
Tabla 3.12. Rendimiento de la clasificación de abeto blanco	31
Tabla 3.13. Valores característicos para las diferentes clases visuales de abeto blanco.....	36
Tabla 3.14. Valores característicos para las diferentes clases visuales de abeto blanco.....	37
Tabla 3.15. Asignación de clase resistente para las diferentes clases visuales de abeto blanco	37
Tabla 3.16. Asignación de clase resistente para las diferentes clases visuales de abeto blanco	38
Tabla 3.17. Asignación de clase resistente para las clases visuales de las diferentes normas europeas de acuerdo con UNE-EN 1912	38
Tabla 5.1. Datos de las regiones de procedencia del abeto en España	44
Tabla 5.2 Especificaciones de la calidad MEG de la norma UNE 56544.....	52
Tabla 5.3 Contenido de humedad de los lotes.....	59
Tabla 6.1 Causa de rechazo de piezas en Grupo A.....	62
Tabla 6.2 Causa de rechazo de piezas en Grupo C.....	63
Tabla 6.3 Resultados de los ensayos del Grupo A.....	65
Tabla 6.4. Resultados de los ensayos de los subgrupos del Grupo A considerados como lotes	65
Tabla 6.5 Resultados de los ensayos de los subgrupos ficticios del Grupo A considerados como lotes.....	66
Tabla 6.6. Resultados de los ensayos del Grupo B	66
Tabla 6.7. Resultados de los ensayos del Grupo C	67
Tabla 6.8. Resultados de los ensayos de los rechazos	67
Tabla 6.9 Valores característicos de la población española.....	73
Tabla 6.10 Valores característicos de las clases resistentes UNE-EN 338.....	73

Índice de tablas

Tabla 6.11. Valores característicos de la población Pirineos	74
Tabla 6.12 Principales descriptivos estadísticos de los lotes Pirineos	76
Tabla 6.13. Test de Rango Múltiple para identificación de grupos homogéneos.....	77
Tabla 6.14 Valores característicos de la población Pirineos con lotes incompletos.....	78
Tabla 6.15 Valores característicos de la población Pirineos con lotes ficticios	80
Tabla 7.1 Criterios de clasificación MEG para el abeto blanco	83

Figura 3.1. Distribución actual del <i>Abies alba</i> en el área circunmediterránea.	10
Figura 3.2. Área de distribución actual de las poblaciones de <i>Abies alba</i> por comarcas geográficas en la Cordillera Pirenaica.	11
Figura 3.3 Porte del abeto blanco.	12
Figura 3.4. Fotografía de la madera de abeto.	12
Figura 3.5 Estructura tubular de la madera.	18
Figura 3.6 Nudo con la desviación local de la fibra que genera y la desviación general patente por las fendas.	19
Figura 3.7. Comparación de las curvas de evaluación de la resistencia en relación a la duración de la carga. Curva de Madison y curva Eurocódigo 5.	22
Figura 3.8. Variación de la resistencia a la flexión estática con el contenido en humedad.	23
Figura 3.9. Medición de nudos.	27
Figura 3.10 Clasificadora mecánica automática Cook-Bolinder.	32
Figura 3.11. Vibración longitudinal.	34
Figura 4.1 Pórtico de ensayos del laboratorio INCAFUST.	40
Figura 4.2 Pórtico de ensayos del laboratorio Cesefor.	41
Figura 5.1 Mapa de regiones de procedencia del abeto en España.	44
Figura 5.2. Distribución europea del abeto.	45
Figura 5.3. Zonas concéntricas en cada troza.	46
Figura 5.4. Configuración del ensayo a flexión y puntos principales UNE-EN 408. ..	49
Figura 5.5. Diagrama fuerza deformación.	56
Figura 6.1 Coeficiente k_s en UNE-EN 384.	72
Figura 6.2. Diagrama de caja y bigotes para los lotes de la muestra Pirineos.	76

En primer lugar deseo expresar mi agradecimiento y gratitud al director de esta tesis doctoral, Dr. D. Francisco Arriaga. Hace ya muchos años, como profesor, por crear en mí el interés que se convirtió luego en pasión por la madera y su uso estructural. Ahora, como director de la tesis, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por su disponibilidad y excelente predisposición, por el respeto a mis sugerencias e ideas, muchas veces vehementemente insensatas, y por la dirección y el rigor que ha proporcionado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde el primer momento, por la sabiduría en guiarme y, sobre todo, por su calidez como persona. También a las personas que han evaluado el trabajo me han animado y me han ayudado a mejorarlo, en especial Miguel Esteban, Guillermo Íñiguez y Joaquín Montón.

Un trabajo de investigación es siempre fruto de ideas, proyectos y esfuerzos previos que corresponden a otras personas. En este caso mi especial agradecimiento a Mike Badia, junto a quien di mis primeros pasos en la caracterización de la madera y de quien guardo el sentimiento de su valía, especialmente como persona. Muchos otros han colaborado y aportado ideas, trabajo y esfuerzo, y para ellos va mi agradecimiento. Para Jordi Civit, que siendo alumno fue un compañero. Para todas las personas del Departament d'Enginyeria Agroforestal de la UdL, y los estudiantes que se implicaron en el desarrollo del conocimiento. Para INCAFUST y especialmente para Jordi Gené y Eduard Correal y para Cesefor, donde hubo tiempos felices, para José Luis, Sergio y Edgar. Sin ellos no hubiera sido posible alcanzar el resultado.

Mi agradecimiento especial para las empresas que han colaborado y hecho posible este trabajo. Muy en particular para Javier Safont, de Maderas Safont Pedarrós en Bossòst, quien se atrevió a desafiar al futuro y puso no sólo conocimientos, apoyo y valía personal, sino también la financiación por los primeros estudios con el abeto. También al resto de aserraderos, Maderas Sebastià en Rialp, Serrería Sanz Hermanos en Burgui y Maderas Jimeno en Pamplona.

También el agradecimiento para la Dirección General de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Departamento de Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Administración Local del Gobierno de Navarra que financió los ensayos del abeto de Navarra, y especialmente al Servicio de Montes y a quien lo encabeza, Fermín Olabe, por su capacidad de visión y apoyo.

Pero un trabajo de investigación es también fruto del reconocimiento y del apoyo vital que nos ofrecen las personas que nos estiman y a las que estimamos. En su ausencia no tendríamos la fuerza y energía que nos anima a crecer como personas y como profesionales. Sin ti, Vanessa, no sería posible.

Espero con esta tesis doctoral, aportar mi poquito para alcanzar un futuro mejor para las personas que trabajan la madera, especialmente la del abeto.

“Solamente aquel que construye el futuro tiene derecho a juzgar el pasado”

A todos, muchas gracias. Nos encontraremos en alguna parte, y sonreiremos.

Resum

El present document conté el treball de recerca per a la caracterització mecànica de la població d'abet blanc (*Abies alba* Mill.) procedent del Pirineu en els seus dos vessants, espanyola i francesa. S'ha estudiat de forma independent la població del vessant espanyola, que correspon amb la població d'abet blanc d'Espanya. Inclou l'assignació de classe resistent d'acord amb UNE-EN 338 per a les dues poblacions.

L'estudi compta amb una mostra total de 351 peces distribuïdes en cinc seccions: 120x75, 145x70, 150x70, 160x120 i 250x200 mm. S'han mostregat les dues regions de procedència que contenen més del 90% de la població d'abet. Les provetes procedeixen de les zones amb major densitat de població de l'abet: Irati i Vall d'Aran. Es completa amb provetes de Roncal i Pallars Sobirà, a Espanya, i de Haute Garonne a França.

Les provetes es van agrupar en cinc lots, definits per la secció.

Es va realitzar un recull de les característiques i singularitats de cada proveta. Les provetes van ser classificades amb els criteris de qualitat de la classe visual MEG continguda en UNE 56544. Es va comprovar que el rendiment de la classificació és bo, l'eficiència alta.

Es van assajar totes les provetes d'acord amb UNE-EN 408. Es van calcular els valors característics per a cada lot de la resistència a flexió, el mòdul d'elasticitat longitudinal i la densitat d'acord amb UNE-EN 384. Es van calcular els valors característics de la població espanyola i de la població completa d'acord amb la mateixa norma.

Es va realitzar l'assignació de classe resistent d'acord amb UNE-EN 338. A la població espanyola li correspon una classe resistent C20, a la població Pirineus una C22. La diferència de classe resistent es deu exclusivament a l'augment de la mostra (reducció d'incertesa), no a millors propietats de la fusta francesa. No obstant això, la mostra completa és més consistent.

L'assignació a la classe resistent va ser determinada en les dues poblacions per la resistència a flexió. El mòdul d'elasticitat longitudinal i la densitat són molt superiors als establerts per a la classe resistent. La classe resistent sense considerar la resistència a flexió és una C30

S'ha estudiat la influència de l'alçada de la secció en la resistència a flexió. Els resultats mostren una influència elevada, més gran que la recollida per UNE-EN 384. El paràmetre de l'efecte de l'altura de la secció α és al voltant de 0,37. La influència de l'altura de la secció és més gran en les peces de pitjor qualitat.

S'ha estudiat la possibilitat d'ús de lots incomplets i aleatoris. Els lots incomplets poden tenir un ús limitat. Es descarten lots aleatoris.

Resumen

El presente documento contiene el trabajo de investigación para la caracterización mecánica de la población de abeto blanco (*Abies alba* Mill.) procedente de la cordillera pirenaica en sus dos vertientes, española y francesa. Se ha estudiado de forma independiente la población de la vertiente española, que corresponde con la población de abeto blanco de España. Incluye la asignación de clase resistente de acuerdo con UNE-EN 338 para las dos poblaciones.

El estudio cuenta con una muestra total de 351 piezas distribuidas en cinco secciones: 120x75, 145x70, 150x70, 160x120 y 250x200 mm. Se han muestreado las dos regiones de procedencia que contienen más del 90 % de la población de abeto. Las probetas proceden de las zonas con mayor densidad de población del abeto: Irati y Valle de Arán. Se completa con probetas de Roncal y Pallars Sobirà, en España, y de Haute Garonne en Francia.

Las probetas se agruparon en cinco lotes, definidos por la sección.

Se realizó una recopilación de las características y singularidades de cada probeta. Las probetas fueron clasificadas con los criterios de calidad de la clase visual MEG contenida en UNE 56544. Se comprobó que el rendimiento de la clasificación es bueno, la eficiencia alta.

Se ensayaron todas las probetas de acuerdo a UNE-EN 408. Se calcularon los valores característicos para cada lote de la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad longitudinal y la densidad de acuerdo a UNE-EN 384. Se calcularon los valores característicos de la población española y de la población completa de acuerdo a la misma norma.

Se realizó la asignación de clase resistente de acuerdo con UNE-EN 338. A la población española le corresponde una clase resistente C20, a la población Pirineos una C22. La diferencia de clase resistente se debe exclusivamente al aumento de la muestra (reducción de incertidumbre), no a mejores propiedades de la madera francesa. Sin embargo, la muestra completa es más consistente.

La asignación a la clase resistente fue determinada en ambas poblaciones por la resistencia a flexión. El módulo de elasticidad longitudinal y la densidad son bastante superiores a los establecidos para la clase resistente. La clase resistente sin considerar la resistencia a flexión es una C30

Se ha estudiado la influencia de la altura de la sección en la resistencia a flexión. Los resultados muestran una influencia elevada, mayor que la establecida por UNE-EN 384. El parámetro del efecto del tamaño α está en torno a 0,37. La influencia de la altura de la sección es mayor en las piezas de peor calidad.

Se ha estudiado la posibilidad de uso de lotes incompletos y aleatorios. Los lotes incompletos pueden tener un uso limitado. Se descartan lotes aleatorios.

Summary

The present document contains the research work covering the mechanical characterization of the Pyrenees population of white fir (*Abies alba* Mill.) including Spanish and French watersheds. The Spanish side population, which corresponds to the whole population of white fir in Spain, was independently studied. Additionally, the strength class assignment, according to UNE-EN 338, has been included for both populations.

The study contains a total sample of 351 pieces of sawn timber divided into five cross sections: 120x75, 145x70, 150x70, 160x120 and 250x200 mm. The two origin regions sampled contain more than 90% of the overall population of fir. The pieces come from areas with the highest fir population density: Irati and Valle de Arán. The sample was completed with pieces from Roncal Valley and Pallars Sobirà in Spain, and from Haute Garonne in France.

The specimens were grouped into five samples, defined by section.

The visual grading parameters of each single piece were recorded. The specimens were classified according the MEG visual class grading criteria (UNE 56544). The output result shows a high efficiency.

All sawn timber pieces were tested according to UNE-EN 408. Characteristic values of the bending strength, the modulus of elasticity, and the density were calculated according to UNE-EN 384 for each sample. Characteristic values were calculated from the Spanish population and the entire population according to the same standard.

Strength class assignment was carried out according to UNE-EN 338. A C20 strength class was obtained to the Spanish population, and a C22 to the Pyrenees population. The difference in strength class is exclusively due to the increase of the sample (reducing uncertainty), not to different characteristics of French timber. However, the entire sample is more reliable.

Assignment to strength class was determined in both populations for bending strength. The modulus of elasticity and density are considerably higher than those for the strength class. The strength class without considering bending strength achieves a C30 strength class.

The influence of the height of the cross-section in bending strength was analyzed. The results show a high influence, greater than that established by UNE-EN 384. The parameter of the height effect α is around 0.37. The influence of this parameter increases as the timber quality decreases.

The possibility of using incomplete and random samples was evaluated. Incomplete samples might be used in several circumstances. Random sampling was discarded.

1 Introducción

El abeto blanco (*Abies alba* Mill.) es un árbol que se extiende irregularmente por la cordillera pirenaica, especialmente en la parte central y occidental de los Pirineos. Tiene dos puntos principales Irati y el Valle de Arán, que destacan no sólo por la abundancia en términos absolutos sino también por ser la conífera más abundante en esas zonas. Es también frecuente en otros puntos de la cordillera, aunque con menor peso relativo, como Roncal y Pallars.

La madera de abeto se ha usado muy frecuentemente en España, de manera tradicional, en la edificación rural en aquellas zonas en las que no es escasa. El uso estructural ha sido el principal de la especie, con poco aprovechamiento para otras aplicaciones. Una madera que en estas comarcas ocupa un lugar destacado en la preferencia para el uso en viguería, particularmente en cubiertas. El abeto ofrece fustes largos y cilíndricos que permiten obtener vigas de grandes dimensiones y de un color claro y homogéneo. Las zonas de abundancia de abeto han dispuesto siempre de aserraderos para su transformación, que en muchos casos perduran hasta hoy.

El uso en edificación siempre ha exigido un elevado nivel de seguridad, más aún en el caso rural español en el que el carácter patrimonial de la vivienda como elemento vertebrador de la familia y con vocación de imperecedera ha primado la robustez, y el compromiso siempre presente con el coste se decantaba claramente hacia la seguridad. Una seguridad que descansaba en el conocimiento de los oficios, en la tradición artesana, en la experiencia, al menos centenaria, en el uso, en las reglas de los gremios.

La llegada de materiales modernos a la construcción, sin artesanos, sin reglas empíricas, sin experiencia, obligó a desarrollar modelos de cálculo y sistemas de caracterización, a la vez que aún manteniendo la exigencia de seguridad, el equilibrio de costes adquirió mayor importancia. En España, la madera aserrada, probablemente debido a sus excelentes propiedades, se mantuvo en la mayor parte de los casos impermeable a estas tendencias durante la casi totalidad del siglo XX. Sin embargo, se fue perdiendo el capital del conocimiento artesano.

Nos encontramos así, en el caso particular del abeto, con los últimos años del siglo en los que había una fuerte demanda de madera estructural en algunas zonas, como el Valle de Arán; una demanda exigente en seguridad y en economía, sin un cuerpo normativo que diera soporte a estas demandas; un material con muy insuficiente conocimiento de sus propiedades a pesar de la larguísima experiencia en su uso; y falta de suficientes artesanos que la interpretasen.

En ese momento, el Eurocódigo 5 aportó una crucial vía de avance a la madera aserrada, en un doble sentido: una normativa de cálculo que llenaba el vacío, y la integración en un cuerpo normativo completo que integraba modelos de cálculo generales y normas para otros materiales, los Eurocódigos. Además son de aplicación en toda la Unión Europea,

desarrollados en aquellos países tan lejanos, nos parecía, y tan avanzados, deseábamos. El Eurocódigo 5, unido a la normativa europea que se desarrolló para darle soporte y obtener los valores característicos que aquel exigía, fue un salto que cambió el modo de usar la madera. Un salto que obligó a un esfuerzo arquitectos e ingenieros, pero sobre todo a la industria de la madera que necesitaba proporcionar los valores característicos de los productos que comercializaba.

En ese mismo punto arranca el trabajo de esta tesis, para una madera, la del abeto, de la que a diferencia de lo que sucedía por ejemplo en Francia y en algunas especies españolas, no disponía de datos experimentales sobre sus propiedades en tamaño comercial. Los costes de caracterización son relativamente elevados para una industria formada por PYMES, la mayoría familiares. Con un mercado, el de productos estructurales, con una fuerte competencia y en la que ocupan una posición competitiva poco favorable en un contexto europeo o mundial.

Los aserraderos locales con una producción corta compiten en primer lugar con aserraderos de la Unión Europea. Aserraderos con una producción cualitativamente mayor, con estructura comercial bien implantada, que en productos de dimensiones estándar suponen una muy dura competencia. En el caso de la gran escuadría, sin embargo, con dimensiones no estándar y pedidos pequeños, la competencia es menor. Compiten asimismo con lo que se ha llamado madera técnica, que es muy competitiva no sólo, y en ocasiones no tanto, por sus propiedades sino también por la documentación/información y el soporte comercial que proporcionan. Los fabricantes de madera técnica corresponden, excepto en algunos casos de elevada especialización y gran innovación, con empresas de tamaño mucho mayor que los aserraderos españoles. Un mayor tamaño que implica capacidad de inversión, de financiación, comercial. En el caso de otros materiales, como hormigón o acero, el tamaño se dispara, lo que lleva consigo una capacidad de presión del mercado incomparable. En resumen competencia muy elevada tanto dentro del material madera como con otros materiales.

En esta situación aparece, para los aserraderos que comercializan madera estructural, la necesidad, impulsada por la normativa y por el mercado, de obtener los valores característicos y elaborar/proporcionar información y documentación que aporte seguridad al producto. La posibilidad de repercutir el coste de la caracterización en el producto está muy limitada por las bajas producciones, ya que el coste supone un elevado impacto por unidad. La capacidad de inversión es reducida. En este contexto tan estresado se inició una vía de caracterización de maderas con procedencia muy restringida y ajustada a las zonas de suministro del o de los aserraderos y con aplicación también restringida.

Una vía que comenzó Maderas Safont Pedarròs en el Valle de Arán y que posteriormente se ha repetido con varias especies y regiones, en compatibilidad con proyectos de caracterización de ámbito nacional. Un desarrollo que se ha ido adaptando a la evolución de la normativa europea y nacional, que con la aprobación del Código Técnico de la Edificación (CTE) en 2006 dio el impulso decisivo a la madera. El CTE incluye para la madera,

como para el resto de materiales, un documento básico de seguridad estructural. Al igual que sucedió con los Eurocódigos, supone un enorme acierto para la madera estar integrado en un cuerpo con el resto de materiales, con requisitos comunes para todos. Se han desarrollado nuevos proyectos de caracterización local. Nuevos trabajos con el abeto, incompletos para una clasificación nacional, pero que han llevado al punto en el que los datos, usados en conjunto, permiten abordar una clasificación de ámbito nacional para el abeto, con una muestra mucho más robusta.

El presente trabajo de investigación aborda esta cuestión directamente además de explorar algunos aspectos complementarios, como es el manejo de las muestras o la influencia del tamaño de la sección. En este punto parece pertinente recordar la enorme importancia que estos trabajos tienen. No sólo por lo evidente, incrementar las opciones disponibles para la construcción, sino también por su positiva repercusión tanto en la economía, y por ende en la sociedad local/regional, como en el medio ambiente, y por tanto en la sociedad global.

Los recursos forestales, y particularmente la madera, es una opción de primer orden en la generación de rentas en muy amplias zonas rurales de España, en la que. por otra parte. no existen, de modo general, muchas más oportunidades. Sin embargo, en un modelo exclusivamente extractivo, cortar la madera y llevarla lejos para su transformación, la capacidad de generación de actividad económica y empleo es baja. Es la industrialización, la transformación de la madera para obtener productos del mayor valor añadido posible, el camino para generar desarrollo visible, significativo y sostenible. Y la madera estructural, especialmente de gran escuadría, es un producto clave en este catálogo de productos de mayor valor añadido en el que los aserraderos pequeños pueden competir.

En un enfoque medioambiental amplio, la madera cumple una función positiva de alto alcance. Como es bien conocido, los árboles absorben dióxido de carbono, CO₂, que queda almacenado en la madera. El carbono es usado para formar los hidrocarburos que constituyen esencialmente la madera, y emiten oxígeno. Cuando cortamos los árboles, el dióxido, en realidad su carbono, permanece, y sigue atrapado mientras existe la madera. En el caso de muerte natural la descomposición es rápida, la existencia de la madera es corta. En cambio en los productos de madera puede ser muy larga, de cientos e incluso miles de años, que después aún puede ser reusada y reciclada. La madera estructural, que habitualmente tiene una vida útil larga, permite conservar el CO₂ fuera de la atmósfera mucho tiempo y por tanto relajar el cambio climático. Cada tonelada de madera almacena 1,8 t de CO₂. A la vez cada tonelada de madera sustituye a toneladas de otros materiales. Se evitan así enormes emisiones derivadas de la fabricación de otros materiales, acero, aluminio vidrio, cemento.

Cuanta más madera pongamos en nuestras casas, menos dióxido de carbono en la atmósfera. El uso intenso de madera en una vivienda equivale a decenas de años de las emisiones que se generan en esa vivienda por iluminación, calefacción, vehículos,... Más madera, menos CO₂. Plantar árboles y fabricar estructuras de madera es el método de mejor relación beneficio/coste de fijación de carbono, que genera empleo y sociedad.

El presente trabajo pretende, también, ayudar a cumplir con este propósito.
Más madera.

2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de investigación es la caracterización mecánica de la madera de abeto del Pirineo y su adscripción a una clase resistente que permita su uso como material estructural y el marcado CE de sus productos.

Un trabajo y un objetivo que se iniciaron con la llegada del Eurocódigo 5 y que se está alcanzando casi 20 años después. Ahora, con el Código Técnico de la Edificación plenamente integrado, se hace imprescindible la existencia de una clase resistente para el abeto, una madera de amplia tradición en uso estructural. Del mismo que otras especies como el pino silvestre, el pino laricio y el pino radiata, por ejemplo. Y el abeto de origen francés.

Son objetivos específicos los siguientes:

- Obtención de una clasificación visual para el abeto blanco que cumpla requisitos de eficiencia y eficacia, y adecuada para su uso comercial en aserraderos, con la máxima compatibilidad posible con UNE 56544 y en base a la UNE-EN 14081;
- Obtención de las propiedades físicas, mecánicas y elásticas necesarias para la asignación a una clase resistente de acuerdo a la normativa europea;
- Proponer una clase resistente para la madera de abeto de procedencia Pirineos y otra para la población de origen español que sirva de base para el marcado CE de la madera de abeto;
- Evaluar la compatibilidad de los lotes de origen español con las de origen francés;
- Evaluar la influencia del canto en flexión en la resistencia a flexión;
- Evaluar el uso de opciones no recogidas en la normativa para optimizar la muestra.

3 Antecedentes

3.1 *Abies Alba* Mill. Descripción breve de la especie.

El género *Abies*, que cuenta con 33 especies en el mundo, se distribuye por latitudes medianas y altas del hemisferio norte. En muchas de las regiones que ocupa constituye la especie más competitiva, con una exitosa estrategia de ocupación. De este modo forma a menudo grandes masas esencialmente monoespecíficas que ocupan todo el territorio.

La especie objeto del trabajo, *Abies alba* Mill., el abeto blanco, tiene una distribución europea. La especie, con exigencias de alta humedad y poca tolerancia a las altas temperaturas, ocupa fundamentalmente las montañas del centro del continente, tal como se muestra en la Figura 3.1.

España es uno de los límites meridionales de la especie. Su población se concentra en los Pirineos, ya que allí encuentra las condiciones necesarias, tal como se ve en la Figura 3.2,. Su población es relativamente abundante por zonas, formando abetales y bosquetes con frecuencia asociado al haya. Sin embargo existen pequeñas poblaciones fuera de la cordillera pirenaica, en el macizo de la Peña Oroel/San Juan de la Peña, en Guara, ambos del prepirineo, y en el Montseny.

Figura 3.1. Distribución actual del *Abies alba* en el área circummediterránea. Tomada de Alba 2009

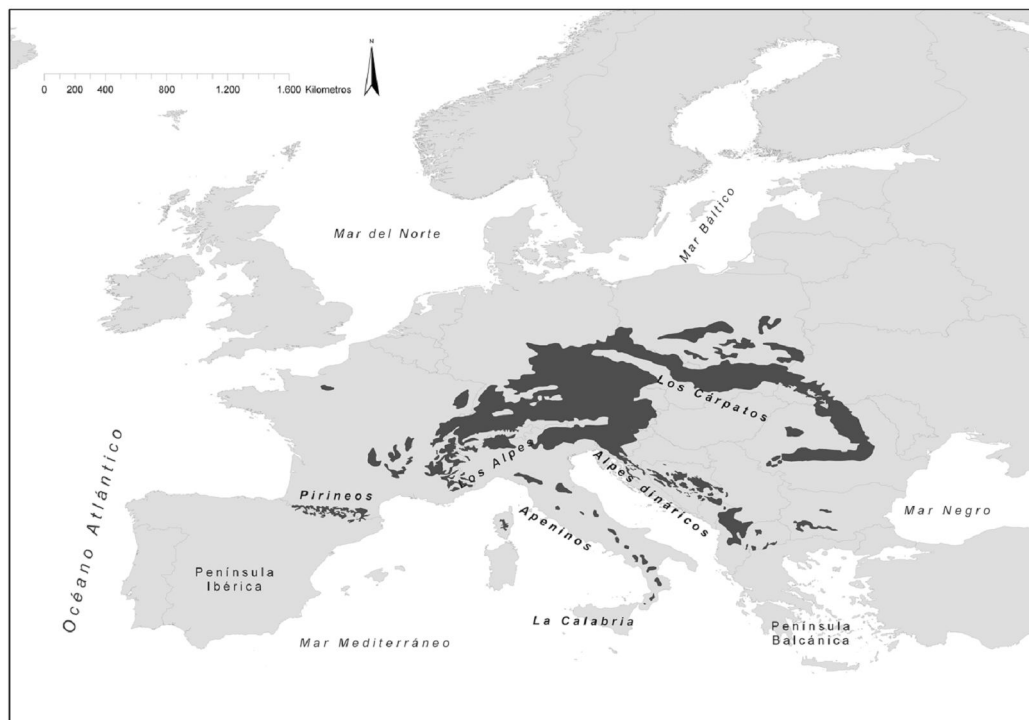
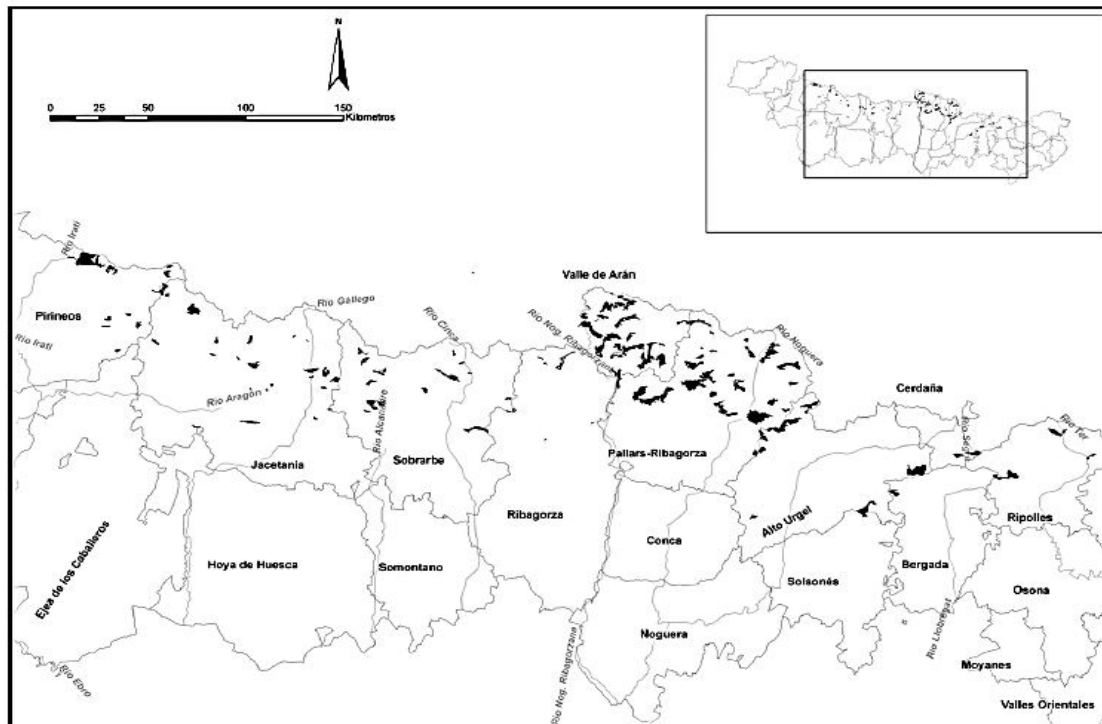


Figura 3.2. Área de distribución actual de las poblaciones de *Abies alba* por comarcas geográficas en la Cordillera Pirenaica. Tomada de Alba 2009



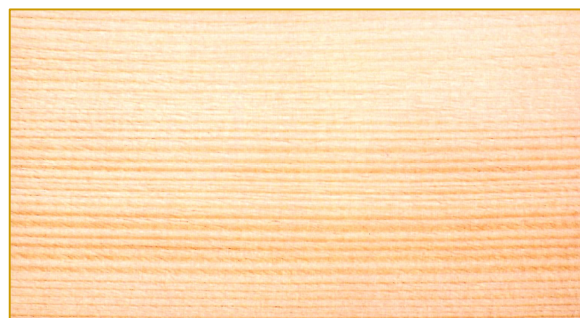
El abeto blanco tiene una conformación que lo hace especialmente interesante para uso estructural, con fustes rectos, cilíndricos y que alcanza con mucha frecuencia gran altura, siendo una de las especies que alcanza mayor altura de entre las españolas, puede llegar a los 45 m, y por lo tanto de mayor longitud de fuste. Tiene una gran predominancia apical, por lo que es raro encontrar bifurcaciones y ramas gruesas, que además adoptan una posición horizontal, lo cual se traduce en nudos medios y pequeños. En la Figura 3.3 se muestra el porte típico del abeto blanco en una formación habitual en mezcla con hayas (https://es.wikipedia.org/wiki/Abies_alba 2015).

Figura 3.3 Porte del abeto blanco https://es.wikipedia.org/wiki/Abies_alba



La madera del abeto acompaña a su morfología para resultar un buen material estructural. Tiene un aspecto característico y apreciado, de color claro, entre blanco y rosado, sin brillo y muy poco resinosa, sin distinción de color entre la albura y el duramen. Los anillos de crecimiento son estrechos, compactos y con poco contraste de color. Se trata por tanto de una madera de color homogéneo y agradable, que combinada con su grano fino que permite un perfecto cepillado y la fibra recta, confiere gran personalidad y buen comportamiento a las piezas estructurales.

Figura 3.4. Fotografía de la madera de abeto (Guindeo 1997)



3.2 *Ámbito geográfico del estudio*

El estudio abarca toda el área de distribución del abeto blanco en los Pirineos, tanto en la vertiente española como francesa. No se han incluido las poblaciones del prepirineo, Peña Oroel/San Juan de la Peña y Guara, ni el Montseny debido a la muy baja representación que tienen en la población y nula representación en el comercio y uso de su madera. Dado el valor científico que tienen estas poblaciones no es probable que sean cortados para uso comercial.

El muestreo se ha centrado en las zonas con mayor representación de la población de abeto: Selva del Irati y Valle del Garona (Valle de Arán y su continuación en Francia) son los dos puntos más importantes, que se han complementado con Valle del Roncal y Pallars Sobirà.

3.3. *Características físico-mecánicas en probetas libres de defectos*

Tal como se relata más adelante en este mismo capítulo, durante muchos años el estudio de las propiedades de la madera se realizó sobre probetas de pequeñas dimensiones completamente libres de defectos, con la fibra completamente recta y la posición de los anillos bien definida. El objetivo era conocer los valores de la madera en sí misma, sin ninguna clasificación, sin definición de calidad. Los valores de las propiedades físicas continúan obteniéndose de la misma forma, y son representativas de las piezas de madera estructural. Las propiedades mecánicas en cambio planteaban varios problemas. La aplicación para el cálculo estructural se realizaba a través de coeficientes, incluidos coeficientes de seguridad, que se aplicaban a los valores obtenidos hasta obtener la tensión admisible.

Como primer avance de las propiedades de la madera de abeto para uso estructural podemos ofrecer resultados de estos valores para el ámbito geográfico de la especie. Los estudios realizados son menos abundantes que otras especies, como el abeto rojo, como es menor su presencia en el mercado.

Para el abeto de España podemos resumir las propiedades físicas y mecánicas (Guindeo 1997) en las Tablas 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3.1. Propiedades físicas de la madera de abeto

Propiedades físicas	
Densidad	440-460-480 kg/m ³
Contracción	Medianamente nerviosa
Coeficiente de contracción	
Volumétrica	12-15%
Tangencial	8,3%
Radial	4,1%
Dureza	1,4 Blanda

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas de la madera de abeto

Propiedades mecánicas	
Flexión estática	62-90 N/mm ²
Mod. Elasticidad	10.000-14.500N/mm ²
Comp. axial	40-52 N/mm ²
Comp. perpendicular	3,5 N/mm ²
Cortante	4,9-7,5 N/mm ²
Flexión dinámica	3,5-6,5 J/cm ²

Para el resto de Europa, los estudios más abundantes sobre las características físico-mecánicas de la madera de abeto los encontramos en Polonia y en los Alpes.

Centrándonos en primer lugar en Polonia, tenemos unos primeros resultados (Niedzielska 1987) mostrados en la Tabla 3.3, elaborados con madera de abeto obtenida de pies en dos franjas de edad de 80 a 120 años y de 120 a 160 años, sin que se encontraran diferencias significativas.

Tabla 3.3 Propiedades físico mecánicas (Niedzielska 1987) por clase de edad

Edad	Compresión (MPa)	Tracción (MPa)	Flexión (MPa)	Dureza (MPa)
80-120	47,03	74,25	75,22	40,98
120-160	43,88	74,84	73,86	43,44

El mismo autor realizó otro estudio (Niedzielska 1989), cuyos resultados se ofrecen en las Tablas 3.4 y 3.5, discriminando entre masas puras de abeto, a mayor altitud, y masas mixtas en mezcla con frondosas. Los resultados muestran diferencias no significativas excepto para la anchura de anillo, que en

contra de lo habitual no se traslada a la densidad. En ambas situaciones hay una buena correlación densidad/resistencia a flexión.

Tabla 3.4 Propiedades físicas (Niedzielska 1989) por tipo de masa

	Bosque puro	Bosque mixto
Anchura media de anillo mm	1,71	1,6
Porcentaje madera de otoño %	32,4	32
Densidad (kg/m ³)	435	435
Contracción radial %	4,2	4,3
Contracción tangencial %	9,2	9,2
Contracción volumétrica %	14,2	14,9

Tabla 3.5 Propiedades mecánicas (Niedzielska 1989) por tipo de masa

	Compresión (MPa)	Tracción (MPa)	Flexión (MPa)
Bosque puro	47,5	84,8	76,7
Bosque mixto	46,7	84,2	76,5

Finalmente en lo que respecta al abeto de procedencia polaca, se estableció que la madera procedente de masas irregulares tiene una mayor anchura de anillo, que corresponde, aquí sí, con una menor densidad y menores valores de las propiedades mecánicas (Niedzielska 1990).

Respecto a las poblaciones alpinas de abeto en la Tabla 3.6 se ofrece un resumen de sus propiedades (Lenz 1979) para masas mixtas del Jura. Lenz en su estudio incorpora resultados de otros autores que también se incorporan a la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Propiedades mecánicas de diversas procedencias de acuerdo con Lenz 1979

	LENZ (1979)	KÜHNE (1955)	LAVERS (1969)
Densidad anhidra (kg/ m ³)	0,422	0,425	0,43
Flexión estática (kp/cm ²)	875	860	790
Compresión axial (kp/cm ²)	452	425	423
Cizallamiento radial kp/m ²	127	-	97

Como se aprecia, las diferencias no son grandes entre los diferentes autores, por lo que se pueden elaborar resúmenes de propiedades físicas y mecánicas para el abeto blanco, que se muestran en las Tabla 3.7 y 3.8 respectivamente.

Tabla 3.7. Propiedades físicas

Propiedades físicas	
Densidad	438 kg/m ³
Coeficiente de contracción	
Volumétrica	13,9%
Tangencial	8,7%
Radial	4,2%

Tabla 3.8. Propiedades mecánicas

Propiedades mecánicas	
Flexión estática	74 N/mm ²
Compresión axial	46 N/mm ²
Tracción	74 N/mm ²

3.4 Caracterización de la madera. Madera libre de defectos y madera estructural

El objeto de la caracterización de la madera es proporcionar valores de las propiedades mecánicas, resistencia y rigidez del material, que se puedan emplear en modelos de cálculo que permitan a su vez cumplir la finalidad de la ingeniería, dimensionar los elementos y los sistemas estructurales con una seguridad establecida convencionalmente y que está modulada por el coste. Al variar los modelos de cálculo puede ser necesario cambiar el modo de medir o conocer la resistencia (o rigidez) y viceversa, tal y como ha sucedido a lo largo

del tiempo y a lo ancho de los países. En la historia reciente se han usado dos formas principales de calcular las propiedades del material, con pequeñas probetas libres de defectos y con madera de tamaño comercial.

Las probetas libres de defectos son de pequeño tamaño, normalizado, y en general diferente, para cada propiedad que se estudia, y definida la posición de los anillos de crecimiento. Por ejemplo la obtención de la resistencia a flexión se regula con la UNE 56537, que establece probetas de dimensiones, en milímetros, de 20 x 20 x 300, con los anillos paralelos a una cara. Las probetas de tamaño estructural recogen las dimensiones comerciales y las calidades comerciales. En el ensayo a flexión regulado por UNE-EN 408, único ensayo mecánico imprescindible, se puede usar cualquier sección, aunque se toma como referencia la de 70 x 150 x 2.850 mm, y la disposición de los anillos de crecimiento no está regulada.

La evaluación de la resistencia, primer paso del proceso de cálculo, en piezas estructurales de madera debe considerar tres hechos distintivos: i) la estructura ortótropa de la madera, que en gran parte se deriva de la segunda característica, ii) la estructura tubular orientada axialmente, y iii) la existencia de particularidades o defectos repartidos irregularmente por el árbol y por tanto por las piezas de madera estructural. Estos tres hechos contienen las principales diferencias entre las probetas pequeñas libres de defectos y las probetas de tamaño estructural, y en la forma de caracterizar la madera usando cada uno de los dos métodos.

Estructura ortótropa

La estructura ortótropa de la madera supone que el comportamiento físico, como por ejemplo la contracción, y mecánico, en todas sus variables, es diferente en los tres ejes principales locales, con origen en el punto concreto de estudio. Estos tres ejes ortogonales se denominan: axial o longitudinal, en general paralelo al eje del tronco, aunque en realidad es en la dirección de las fibras de la madera; radial, perpendicular a las fibras siguiendo los radios desde el centro del tronco; y tangencial, también perpendicular a las fibras y tangente a la circunferencia con centro en el centro del árbol que pasa por el punto en cuestión.

Esta circunstancia se resuelve inicialmente obteniendo el valor de cada propiedad para cada eje, ya que lo que se necesita saber es como responde el elemento a los esfuerzos a que se ve sometido, y por lo tanto que componentes tienen los esfuerzos en cada eje. Aparece aquí una primera diferencia entre los dos métodos mencionados, probetas pequeñas libres de defectos y probetas de tamaño comercial.

Las probetas pequeñas tienen en cuenta los tres ejes definidos, con las direcciones axial, radial y tangencial bien definidas y posicionadas, y marcadas por la normativa para los ensayos. Sin embargo para las probetas de tamaño real y para el cálculo de estructuras, puesto que i) en una pieza de tamaño comercial es difícil de predecir cómo van a ir orientados los ejes radial y tangencial, que ii), dado el tamaño de la sección y que los ejes son locales, lo más probable es que varíe su posición sustancialmente en la pieza y respecto a los esfuerzos y que iii) las diferencias en los ejes radial y tangencial son mucho menores que con el eje longitudinal, se diferencian únicamente dos

direcciones: axial o longitudinal y transversal o perpendicular. Esta solución por tanto se traduce en que es necesario definir y calcular los valores de resistencia y de elasticidad para las dos direcciones.

Una importante consecuencia de la diferencia de comportamiento de la madera en los diferentes ejes, unido al carácter higroscópico y a la variación de volumen con la variación del contenido en humedad, es la aparición de deformaciones, que varían en función de cómo se encuentren situados los tres ejes principales con respecto a los ejes de la pieza.

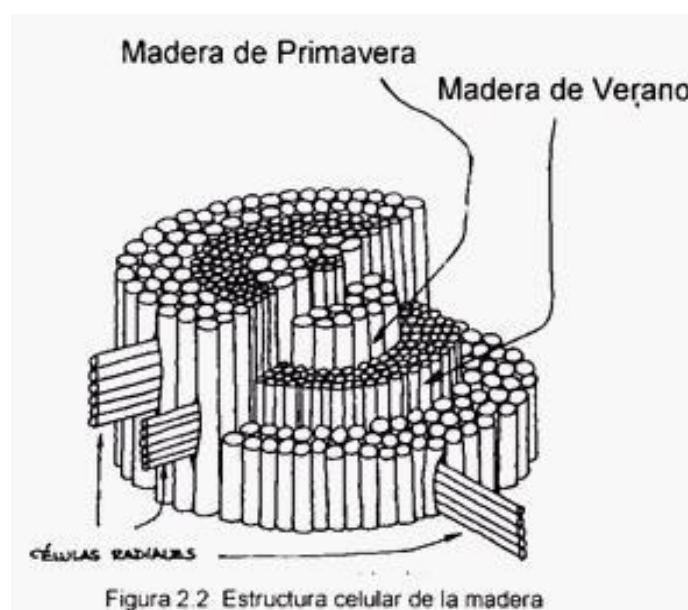
Estructura tubular

La madera de coníferas está mayoritariamente formada por fibras que siguen sensiblemente la dirección del eje del árbol, aunque con dos desviaciones, la debida a la forma cónica de los fustes y de los anillos de crecimiento, y la debida a la forma de crecimiento por división celular que se realiza diagonalmente.

Las fibras son elementos tubulares tal como se muestra en la Figura 3.5 obtenida de <http://www.monografias.com/trabajos48/maderas/maderas2.shtml>, lo cual tiene muy importantes consecuencias en su comportamiento frente a los esfuerzos, su comportamiento estructural. Una estructura en tubo trabaja muy bien en la dirección del tubo, en este caso la dirección axial, pero mucho peor en la dirección transversal. En el caso de esfuerzos perpendiculares a la fibra entra en juego además la ligazón entre las fibras, que es mucho menor que la resistencia de las mismas. Por tanto la resistencia ante esfuerzos transversales es mucho menor, y las propiedades elásticas en dirección transversal también, puesto que se producen deslizamientos de las fibras respecto a las adyacentes.

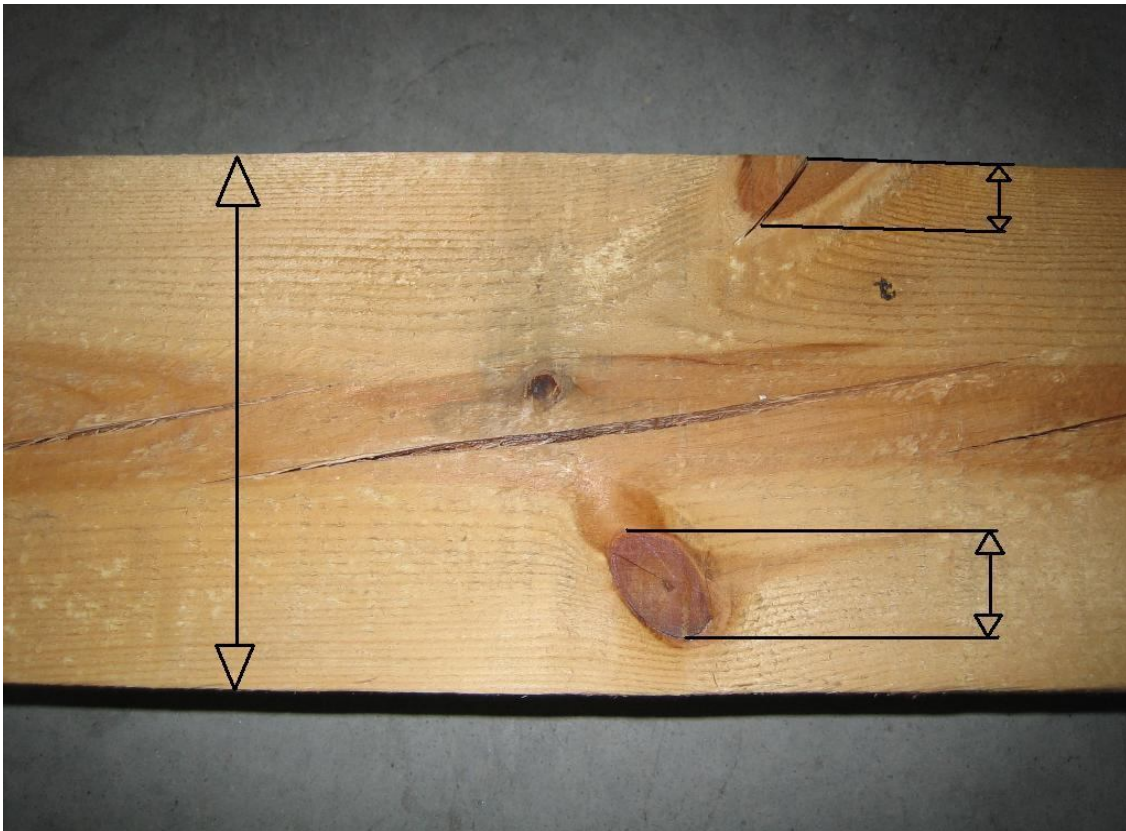
Figura 3.5 Estructura tubular de la madera

<http://www.monografias.com/trabajos48/maderas/maderas2.shtml>,



La madera, pues, trabajará mal a cortante y en principio bien a compresión y a tracción paralelas a la fibra, y por tanto también a flexión, los esfuerzos principales a los que se someten la mayor parte de los elementos estructurales. Sin embargo se produce aquí una nueva distinción entre las probetas sin defectos y las de tamaño estructural. Mientras en las primeras la fibra está perfectamente alineada con las aristas de la pieza en las segundas, como en el caso real de una estructura, hay variaciones. Depende del aserrado que se haya realizado, de la desviación general de la fibra y, sobre todo, de la presencia de irregularidades como los nudos (Figura 3.6) que causan desviación local de la fibra, tal como se comenta en párrafos siguientes. Por lo tanto las probetas de tamaño estructural, a diferencia de las libres de defectos, ya recogen las variaciones de comportamiento debidas a la desviación de la fibra, tanto local como general, respecto al eje de la pieza y por tanto respecto de los esfuerzos.

Figura 3.6 Nudo con la desviación local de la fibra que genera y la desviación general patente por las fendas



Aunque el nombre de defecto no es quizá el que mejor se adecua a su naturaleza y sería quizás más apropiado el nombre de singularidades, por ejemplo, si es el más extendido y el que transmite de forma directa su efecto generalmente negativo sobre el comportamiento de la pieza. De hecho es el que se ha utilizado para el título del apartado y como se denomina una de las formas de caracterizar las propiedades de la madera. Evidentemente, por tanto, existe una diferencia sustancial entre probetas libres de defectos y probetas de tamaño estructural, la presencia de defectos, pero que sólo se pueden comprender contemplando los tres factores mencionados.

Hay una variada relación de defectos, o singularidades que afectan al comportamiento estructural de una pieza de madera. Algunos dependen exclusivamente del proceso de aserrado, como las gemas, otros tienen un origen mixto, mezcla de propiedades de la madera, proceso de secado y sección, como las fendas. Otros, como la desviación general de la fibra, son un efecto combinado del proceso de aserrado y especialmente de la estructura de la madera. Otros, como los nudos, dependen exclusivamente del árbol, ya que no son otra cosa que las ramas seccionadas que inevitablemente están embebidas en el tronco.

Los dos últimos defectos mencionados, desviación general de la fibra y nudos, son los más influyentes en el comportamiento mecánico y elástico de una pieza de madera. Lo podemos ejemplificar con la tracción.

La madera, formada por fibras, sometida a tracción trabaja bien si traslada la tensión a lo largo de las fibras. Si la fibra está desviada, sólo una de las componentes de la tracción, que es paralela al eje de la pieza, puede ser absorbida por la fibra, que no es paralela, por lo que las fibras tienen tensiones perpendiculares a sus paredes y parte de la tracción tiene que ser transmitida entre fibras, lo cual resulta en una pérdida de capacidad de carga. En general cuando la fibra está desviada se produce otro efecto muy significativo, que es la interrupción de las fibras. Al estar desviada la fibra respecto de las aristas, las fibras se encuentran con la arista y se interrumpen, por lo que la tensión que va absorbiendo la fibra, y que es la máxima en caso de flexión, se tiene que transmitir con la lignina: es como cortar los alambres que componen un cable. Y a otra circunstancia añadida en la flexión, al girar las secciones cuando se somete a carga, se despegan unas fibras de otras generando una discontinuidad en la pieza.

Los nudos tienen un efecto combinación de la discontinuidad del nudo respecto a la madera que lo envuelve, la dirección transversal de las fibras que forman el nudo, y, más importante, la desviación de las fibras que deben sortear el nudo; cuanto mayor es el nudo, mayor es la desviación local. Esta desviación tiene cualitativamente los mismos efectos que la desviación general, y, en los casos de nudos grandes, cuantitativamente más importancia. El ángulo de la fibra puede llegar a 90°, con el agravante de que en ocasiones, como se muestra en la Figura 3.6, el nudo se fenda al secarse. En ocasiones se disminuye su efecto relativo si la desviación local no llega a la arista o no está en la zona traccionada.

Estos dos caminos para obtener un valor de resistencia de la madera que pueda ser usado en los cálculos, el ensayo de probetas libres de defectos y el de probetas con tamaño comercial, se han usado en el tiempo de forma consecutiva. Dos caminos que, en vista de lo expuesto anteriormente, dan valores muy diferentes y no comparables entre sí. De modo que los valores obtenidos para probetas libres de defectos, mucho mayores, no pueden ser usados en el sistema actual.

Es cronológicamente anterior el uso de las probetas libres de defectos. Sirva como referencia que la versión vigente de la antes mencionada norma UNE 56537 de ensayo a flexión con probetas pequeñas es de 1979, mientras la normativa con probetas de tamaño comercial se lanzó a finales del siglo XX, y la versión vigente de UNE-EN 408, de alguna manera la homóloga de UNE

56537, es de 2011. El método de cálculo empleado habitualmente era el llamado de las tensiones admisibles. Se partía de un valor de resistencia obtenido de los ensayos, en general el percentil 5 de la distribución de resistencias supuesta normal. A dicho valor se le aplicaban una batería de coeficientes de reducción de la resistencia hasta llegar al valor denominado Tensión admisible que se comparaba con la tensión que soportaba el elemento de madera.

Entre los coeficientes de reducción figuraba, como elemento diferenciador respecto a otros métodos, uno dependiente de la calidad, ya que la resistencia se había obtenido en probetas de calidad perfecta. El método trataba, a partir de una resistencia ideal del material, de calcular la resistencia real a partir de sus singularidades. En este sentido era un método determinista que, aplicado a la madera con toda su variabilidad, suponía una tal amplitud de valores, una incertidumbre tan grande, que obligaba a aumentar los coeficientes de seguridad. Los resultados subestimaban la resistencia en condiciones reales, si bien es cierto que el hábito de diseño estructural con madera, y más de diseño innovador, era bastante menor, por lo que la incidencia era escasa.

El método de las tensiones admisibles siempre tuvo alguna contestación y no resultaba en general satisfactorio, no tanto por las variables que consideraba en el cálculo sino por el modo de obtener los valores de resistencia y por las diferencias de modelo con respecto otros materiales. De este modo se impulsó un cambio completo de normativa, con un esfuerzo particular en la Unión Europea, que fue fraguando en la última década del siglo XX. A mediados de los 90 apareció tanto el Eurocódigo 5 como la normativa de acompañamiento de normas europeas EN, que supuso el cambio completo de modelo.

Se adoptó un método ya usado en otros materiales, probabilista, que renunciaba a describir el elemento estructural. Su validez se basa en representar estadísticamente una población, independientemente de cual sea, pero bien definida en sus criterios de distinción. Se podría caracterizar la madera del género Abies del mundo, o la del pino silvestre de Europa, asignando como resistencia de todas las piezas de esa población el valor que cumple que el 95 % de la población tiene un valor igual o superior. Este valor se llamó característico de la población en cuestión. Los ensayos se realizan con piezas comerciales representativas de la población. Ante las dudas de cuál es la distribución real de las resistencias de una población determinada, se determinó un ajuste no paramétrico para calcular el valor característico.

Para reducir costes, pero fundamentalmente para mejorar la eficacia de las clasificaciones definiendo una población suficientemente homogénea, se establece la población con una especie o grupo de especies afines, una referencia geográfica y una calidad. Así en este trabajo se ha seleccionado una especie, el abeto blanco, un ámbito geográfico, Pirineos, y se busca como uno de los objetivos del estudio establecer unos criterios de clasificación que resulten adecuados, con un buen rendimiento, y eficaz, con unos criterios de clasificación que definan una población homogénea desde un punto de vista resistente.

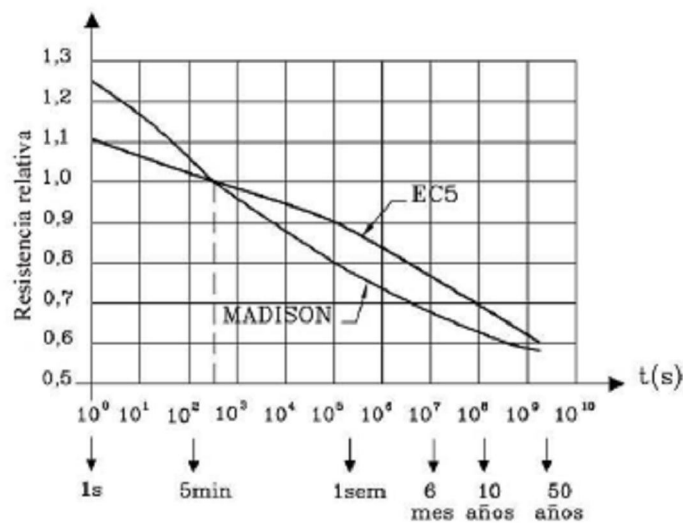
Las condiciones en que se realizan los ensayos no siempre corresponden con las condiciones, por lo que el valor de resistencia obtenido en los ensayos no

es aplicable directamente. Si hay alguna circunstancia que afecte a la resistencia que sea diferente a la de los ensayos, hay que modificar el valor característico. Además aplicar un coeficiente de seguridad del material que intenta absorber la incertidumbre del comportamiento real del elemento y comportamientos desfavorables respecto a los previstos.

Los factores que afectan a la resistencia y que son tenidos en cuenta en el cálculo son esencialmente los mismos en los dos métodos de cálculo mencionados, aunque varía el modo de considerarlos. Son la duración de la carga, la humedad de la madera y el tamaño de la sección.

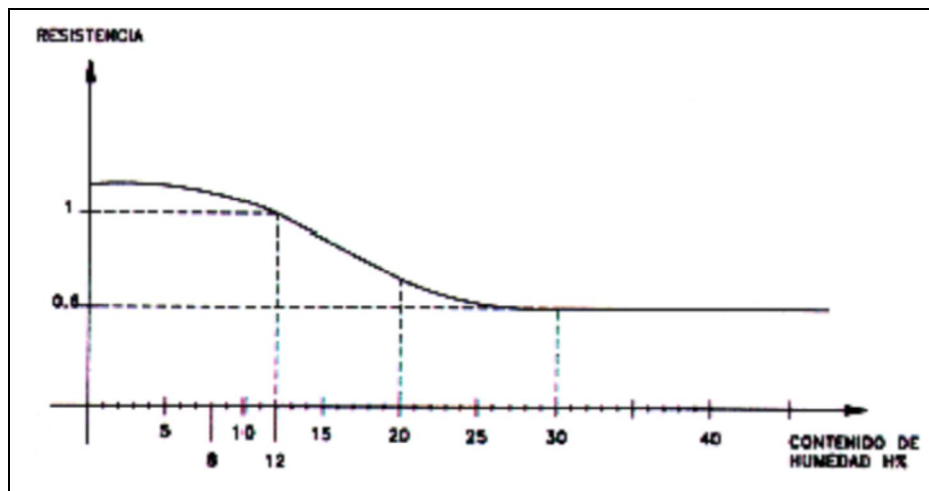
Respecto a la duración de la carga se usó, para evaluar su influencia en la resistencia la curva de Madison (Wood 1951), luego sustituida por la curva elaborada para el Eurocódigo 5, piedra angular de la nueva concepción del cálculo de estructuras de madera. La curva de Madison subestima la resistencia para cargas cortas, menores de un año, y las sobrestima en duraciones mayores. En la Figura 3.7 se ofrece la comparación (Arriaga 2007) entre las curvas de Madison y la elaborada por el Eurocódigo 5.

Figura 3.7. Comparación de las curvas de evaluación de la resistencia en relación a la duración de la carga. Curva de Madison y curva Eurocódigo 5



En cuanto a la humedad, la resistencia de la madera a la flexión estática, tal como se aprecia en la Figura 3.8 (Civit 2000 citando a Argüelles y Arriaga 1996), disminuye conforme aumenta el contenido en humedad de la misma, con la mayor variación entre el 15 y el 20%, y estabilizándose antes del punto de saturación de la fibra.

Figura 3.8. Variación de la resistencia a la flexión estática con el contenido en humedad.



En lo que se refiere a la influencia del tamaño de la sección, se aborda con más detalle más adelante.

Este sistema normativo, basado en ensayos con probetas estructurales de tamaño comercial y plenamente vigente, que se inició con el Eurocódigo 5, se ha mostrado bastante robusto y ha permitido grandes avances en la construcción con madera. El sistema se ha completado con la inclusión de la madera en el Mercado CE, una normativa que vela por la seguridad en el uso de los productos a la vez que establece las responsabilidades, que se ha mostrado muy eficaz. De este modo la madera es más parecida al resto de materiales y ofrece más seguridad y claridad en su uso, simplificando las referencias: el Mercado CE da vía libre a su uso en la Unión Europea. Este Mercado CE, soportado por la norma UNE-EN 14081 para madera aserrada (la parte 1 para clasificación visual en concreto), además establece las condiciones que debe cumplir una norma o regla de clasificación. Homogeneizando así los criterios antes dispersos de las diferentes normas.

De este modo el cuerpo normativo básico para los trabajos de clasificación de madera para uso estructural queda constituido, además de por la referida UNE-EN 14081-1, por la UNE-EN 408 que regula los ensayos de caracterización, la UNE-EN 384 establece las reglas para la estimación de los valores característicos y la UNE-EN 338 que define el sistema de clases resistentes y las fórmulas de asignación de las clases visuales a las resistentes.

3.5 Madera estructural: pequeña y gran escuadría

El ensayo de probetas de tamaño comercial para la obtención de los valores característicos de una población, en general definida por unos criterios de calidad establecidos por alguno de los medios descritos más adelante y que se aplican a las probetas que se ensayan, está plenamente aceptado y no existe

discusión al respecto en la Unión Europea. Sin embargo, como en toda metodología, existen puntos de reflexión que se van descubriendo conforme se va avanzando en la materia. Uno de ellos es el tamaño de las probetas que se ensayan, y por tanto de las piezas que luego se clasifican, para caracterizar una población, que tiene implicaciones importantes y que ha llevado a distinguir la pequeña de la gran escuadría.

La distinción de la pequeña y la gran escuadría es una distinción con límites convencionales para tratar diferenciadamente elementos que presentan particularidades suficientemente relevantes derivadas de la diferencia de tamaño. Ya desde la primera mitad del siglo XX se empezó a tratar del efecto del tamaño sobre la resistencia. Investigadores como Newlin y Trayer primero (Newlin et al., 1924) y Dawley y Youngquist después, empezaron a sentar las bases, que fueron compiladas por Freas y Selbo (Freas et al., 1954) como soporte para la normativa en los Estados Unidos de América.

En la segunda mitad del siglo XX se siguió avanzando sobre la influencia del tamaño de la pieza sobre la resistencia, generalmente inspiradas en la teoría de Weibull (Weibull, 1939) sobre el “eslabón más débil” o punto de mínima resistencia. En definitiva supone que cuánto mayor es el tamaño de una pieza sometida a tensión uniforme, mayor es la probabilidad de encontrar un punto más desfavorable que es el que inicia la rotura y por tanto menor la tensión a la que rompe. En materiales como la madera, con deformaciones relativamente elevadas de las fibras antes de la rotura debido a su bajo módulo de elasticidad, existe una redistribución de las tensiones alrededor del punto débil. De esta manera la zona débil que habitualmente tiene menor rigidez, menor módulo de elasticidad, se deforma y se descarga en las zonas adyacentes, aumentando por tanto la resistencia. Trabajó en esta dirección, Bohannon, estudiando la influencia del volumen en la resistencia a flexión (Bohannon, 1966). Los resultados mostraron un mejor ajuste de la resistencia con la longitud y canto en flexión, en la misma dirección que los ajustes de la normativa actual.

La resistencia a flexión es especialmente interesante porque es uno de los criterios de asignación de clase resistente y porque el efecto es especialmente acusado. En la probeta sometida a flexión, cuanto más corta es mayor es el gradiente de variación del momento flector, por lo que menor es la longitud sometida a tensión máxima, y menor la probabilidad de que en esa tensión máxima haya un defecto importante. Pero además la distribución de las tensiones en la sección transversal también es variable, formando distribuciones triangulares en flexión y en tracción, con máximos en las fibras extremas. En una pieza de gran canto, al ser el gradiente de variación menor, hay más madera sometida a una tensión similar a la máxima, y por tanto mayor probabilidad de tener un defecto en ella. Por otra parte y debido a esa variación suave de la tensión, las fibras adyacentes tienen una tensión muy parecida y no tienen apenas capacidad de absorber tensión de la fibra débil cuando se deforma. De modo que el canto tiene una influencia notable en la resistencia de las piezas, que es mayor cuanto menor es la altura de la sección.

Fueron los estudios de Barret (Barret 1974, 1990) y Madsen (1986, 1992) sentaron las bases que sirvieron para construir la normativa europea actual, estableciendo un coeficiente para evaluar la influencia del tamaño. El coeficiente es el cociente entre una dimensión de referencia, en el caso de la flexión la longitud y la altura de la sección, y la dimensión real de la pieza, elevado al exponente α que se denominó parámetro del efecto del tamaño. Siempre refiriéndonos a flexión se estableció el valor del parámetro α en 0,10 para el canto y de 0,17 a 0,20 que para la longitud.

El Código Técnico de la Edificación, aparecido en 2006 como traslación del Eurocódigo 5, establece para la flexión una corrección con un coeficiente similar, cociente entre la altura de la sección de referencia de 150 mm y la de la pieza, con un exponente α de valor 0,2 para madera maciza. La normativa de cálculo de los valores característicos UNE-EN 384 usa naturalmente la misma expresión.

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.

Hay varios estudios con especies españolas. En el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) Hermoso obtuvo un valor de $\alpha = 0,20$ (Hermoso 2002). En el pino laricio – (*Pinus nigra* subs. *Salzmanii*. Dunal) Franco Fernández-Golfín obtuvo un valor bastante diferente, con $\alpha = 0,51$ (Fernández-Golfín 2002). Hay estudios (Íñiguez 2007) que han buscado una corrección para la resistencia en flexión f no basada únicamente en la altura de la sección h sino también en su anchura b , con una expresión del tipo $f = A (150/h)^B (50/b)^C$, con valores de A , B y C de 19,00 0,27 y -0,32 para el pino silvestres y de 22,71, 0,43 y -0,17 para el pino laricio respectivamente.

3.6 Singularidades de las piezas de gran escuadría

El tamaño de la sección tiene influencia sobre el valor de resistencia pero además hay algunas particularidades en las piezas de gran sección respecto a las de sección más reducida. Estas singularidades, que tienen relevancia en la clasificación visual, han llevado a distinguir en algunas normas de clasificación entre la pequeña y la gran escuadría. Este límite, que como se ha comentado es convencional, en la norma de clasificación visual de coníferas españolas, la UNE 56544, se ha definido para el grosor de la pieza, con la separación fijada en 70 mm, de modo que piezas de mayor grosor se consideran gran escuadría. Otras normas también incluyen la diferencia, como la norma de los países nórdicos NS-INSTA 142 y la alemana DIN 4074-1.

Una característica, quizás la más importante, que distingue a muchas piezas de gran escuadría, es que se fabrican escuadrando el tronco, una viga enteriza, o separando esta viga enteriza en dos mitades, partiendo el corazón, pero ambas con médula. Esta circunstancia tiene varios efectos importantes, mayores en el caso de la viga enteriza.

En primer lugar en estas piezas con médula es probable la existencia de defectos ocultos, especialmente nudos, ya que la rama pudo haberse podado, natural o artificialmente, y por lo tanto no aparece en las caras de la pieza. Esto puede suceder con cualquier dimensión, pero en la gran escuadría es más probable y el nudo puede ser más grande. La influencia en la clasificación visual es evidente, y mayor cuanto mayor es la sección de la pieza.

En segundo lugar está la influencia de la madera juvenil, la primera en formarse alrededor de la médula, que presentan peores propiedades mecánicas y mayores deformaciones. Por tanto las vigas de gran escuadría, al contener habitualmente la médula también incluyen madera juvenil. Sin embargo la influencia en las prestaciones de esta madera juvenil es muy escasa, particularmente en el caso de las vigas enterizas trabajando a flexión. La madera juvenil está envuelta completamente por madera madura más estable y resistente y sometida a bajas tensiones, ya que las fibras extremas son de madera madura. La prohibición de médula que se realiza en algunas clases resistentes elevadas, no tiene sentido en piezas de gran escuadría.

Finalmente, en estas piezas de gran sección el contenido en humedad suele ser mayor y no homogéneo en toda la sección, con diferencias en ocasiones sensibles entre el centro y los bordes de la pieza. De esta manera no es sencillo conocer la humedad real de la pieza, que por otra parte sería más una humedad media. Además en este caso la distinción entre clasificación en seco y en verde no es tan clara, y pueden aparecer posteriormente mermas, deformaciones al ser cargadas (provocadas por la humedad en el interior de la pieza), fendas y deformaciones de secado, típicamente el alabeo.

Es necesario resaltar que la producción de los aserraderos españoles es fundamentalmente de madera de gran escuadría. Las razones son principalmente culturales, por los sistemas estructurales tradicionales, pero también de competitividad, ya que en la gran escuadría son más competitivos frente a la madera de exportación. En los últimos años se han realizado varios estudios de la madera de gran escuadría, con varias especies, como el pino silvestre, el pino radiata y el pino laricio (Íñiguez 2007), el pino silvestre de la Marca de Garantía Pino Soria Burgos, el roble americano del País Vasco o el abeto Douglas de La rioja, Navarra y el País Vasco. El presente trabajo se centra también en escuadrías grandes

3.7 Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera estructural. Clasificación

Tal como se relataba en apartados anteriores, la información básica necesaria para realizar el cálculo de cualquier elemento o estructura con madera es el valor de resistencia de las piezas que vamos a usar. Un valor de resistencia que se obtiene, con la normativa actual, mediante ensayos de una muestra representativa de la población a la que pertenecen las piezas, y que se denomina valor característico. De acuerdo a los valores característicos se

adscribirá a una clase resistente determinada, cuyos valores de las propiedades físicas y mecánicas serán usados en los cálculos.

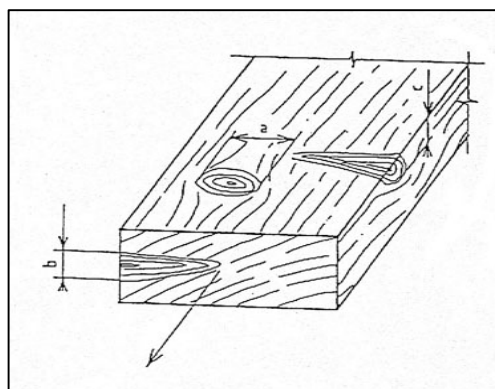
Por tanto, el primer paso es determinar los criterios de definición de la población, que se establecen como un sistema de selección, una clasificación: pertenece a la población, o no. Estos criterios se usan en dos momentos con finalidades diferentes, i) seleccionar los elementos que se van a ensayar, asegurando que pertenecen a la población, y ii) clasificar las piezas que se van a comercializar para asignarlas a la población a que pertenecen y así poder usar los valores obtenidos para la población.

Los criterios de definición de la población, de clasificación, son diversos y persiguen obtener una población lo más homogénea posible desde un punto de vista del comportamiento mecánico. Por ello suelen tener en consideración variables relacionadas con la resistencia. Dos de las variables que están presentes son la especie, o grupo de especies, y un ámbito geográfico. A partir de este tronco común se aplican criterios asociados a técnicas muy diferentes para seleccionar y clasificar, siempre relacionados con la resistencia.

3.7.1 Clasificación visual

La clasificación visual establece como criterio de clasificación, de definición de la población, las singularidades de la madera que pueden ser apreciadas visualmente y medidas directamente en la pieza. Estas particularidades, ya comentadas anteriormente, como nudos, desviación de la fibra y gemas, pero también deformaciones y ataques biológicos, como pudriciones o muérdago, que pueden ser medidas, establecen límites que discriminan la población. Los límites quedan pues establecidos por un valor máximo de cada uno de las singularidades, por ejemplo nudo de cara menor de $1/3$ de la cara o desviación de la fibra menor de $1/10$. El conjunto de condiciones de clasificación, singularidades con su límite, constituye la regla o norma de clasificación, y la población así definida es una clase visual. La norma UNE-EN 14081-1 regula las reglas y normas de clasificación en la Unión Europea, indicando por ejemplo los defectos que cómo mínimo tienen que ser considerados en una clasificación visual, y algunos límites máximos para ellos. A modo de ejemplo se incluye en la Figura 3.9 la forma de medir los nudos en las normas europeas (Badía 1999), la UNE 56544 entre ellas.

Figura 3.9. Medición de nudos (Badía 1999)



Es importante resaltar que cuando se clasifica una pieza de acuerdo a una clasificación visual no se trata de evaluar su resistencia a través de la medida de los defectos, sino que se trata de asegurar que las piezas que se comercializan pertenecen a la misma población que se ha ensayado, y por tanto se le pueden atribuir los valores característicos de la población.

La clasificación visual es sin duda el sistema de clasificación más extendido en España. El motivo principal es que la inversión necesaria es la menor de todos los sistemas de clasificación, ya que únicamente se necesita la formación de los operarios. El principal inconveniente es que la clasificación visual establece poblaciones relativamente heterogéneas, con un rango de resistencias amplio dentro de la clase visual, y por lo tanto se vende mucha madera con unas resistencia declarada (percentil 5) muy inferior a la real. Sin embargo a los aserraderos españoles, por su volumen de trabajo, no les resulta operativo en general tener muchas clases resistentes, lo que conlleva una heterogeneidad implícita y reduce así el inconveniente de la clasificación visual: sea cual sea el método de clasificación, la heterogeneidad dentro de cada clase es inevitable, por lo que en la práctica no resulta significativamente perjudicial.

Es interesante el hecho de que, en caso de elevada producción y necesidad de clasificación en línea a alta velocidad, la clasificación visual se puede realizar también con visión artificial, en ocasiones combinada con rayos X o rayos gamma.

Estas reglas de clasificación habitualmente se recogen en normas de carácter nacional y en ocasiones plurinacional. En el caso de España el ámbito es nacional. La norma UNE 56544 *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*, cuya versión vigente es de 2011, alberga la mayor parte de las reglas de clasificación desarrolladas para madera española. Hay abundantes trabajos de caracterización de maderas españolas para uso estructural que emplean la clasificación visual como metodología de selección. Algunos de ellos han servido de base para la elaboración y ampliación de la norma española, muchos de ellos ya en este siglo XXI, como los realizados por Fernández-Golfín (Fernández-Golfín 1997, 1998, 2001a, 2008), Díez (Díez 2000), Hermoso (Hermoso 2001, 2007b) e Iñiguez (Iñiguez 2005, 2007).

No existe en estos momentos una norma de clasificación española para el abeto, aunque si la hay en numerosos países, como Francia, Alemania, Italia, países nórdicos, etc., tal como se recoge en el Anexo 2. Estas normas contienen una gran diversidad de clases visuales y resistentes que se muestran más adelante en este mismo capítulo.

Sí hay, en cambio, norma española para otras coníferas, como el pino silvestre, el pino laricio, o el pino radiata. Estas especies están recogidas en la citada norma UNE 56544. La norma española establece dos clases visuales ME-1 y ME-2 para pequeña escuadría, espesor menor o igual a 70 mm, y una clase visual MEG para madera de gran escuadría, espesor mayor de 70 mm. Los

criterios de clasificación son únicos para cada clase visual, independientemente de la especie, de modo que las clases resistentes obtenidas para cada clase visual varían con la especie.

Una de las cuestiones principales en la aplicación de una norma es el rendimiento: que proporción de la madera que se somete a clasificación queda efectivamente adscrita a las clases visuales establecidas, es una medida de la eficiencia de la clasificación, tal como se define en el capítulo 6. Un bajo rendimiento pierde utilidad comercial, ya que se dedican muchos recursos para obtener pocos resultados, es ineficiente. El bajo rendimiento tiene un problema añadido, que es quizás el principal, y es que los elementos rechazados ya no tienen uso estructural, y sus dimensiones pueden ser incompatibles con otros usos, por lo que una gran cantidad de madera tiene que ser reprocesada. En el caso de fabricación bajo pedido, el problema es mayor.

La aplicación de las normas ofrece diferentes resultados de rendimiento de clasificación para distintas especies y procedencias, rendimiento que depende por un lado de las características de la madera pero también de la selección previa que se hace de la madera para destinarla al uso estructural.

Hay trabajos realizados sobre diferentes especies para evaluar el rendimiento de las normas de clasificación visual. Podemos citar los realizados con el pino radiata (*Pinus radiata* Don.). Iñiguez aplicó la norma UNE 56544, ya con la clase MEG, al pino radiata (Iñiguez 2005), con el resultado de un porcentaje de rechazos, madera no clasificada, del 17%. Montón, con la misma especie y norma (Montón 2012), obtuvo un rechazo del 73 % para clases resistentes superiores al C18 y del 47 % para igual o menor de C18.

Iñiguez realizó también trabajos con otras especies con piezas de gran escuadría (Iñiguez 2007) y la misma norma UNE 56544, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Rendimiento de diferentes especies españolas de acuerdo a UNE 56544:2003 (Íñiguez 2007).

Especie	Sección	ME-1		ME-2		Rechazo	
		nº	%	nº	%	nº	%
<i>Pinus radiata</i>	150x200	0	0,0	51	63,8	29	36,2
	150x250	0	0,0	36	48,0	39	52,0
	total	0	0,0	87	56,1	68	43,9
<i>Pinus sylvestris</i>	150x200	0	0,0	30	50,0	30	50,0
	200x250	0	0,0	36	60,0	24	40,0
	total	0	0,0	66	55,0	54	45,0
<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>salzmannii</i>	150x200	1	1,7	34	56,7	25	41,6
	200x250	0	0,0	39	65,0	21	35,0
	total	1	0,8	73	60,8	46	38,4
Todas	total	1	0,3	226	57,2	168	42,5

En el mismo estudio utilizó la clase MEG con resultados más satisfactorios, como se aprecia en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Rendimiento de diferentes especies españolas de acuerdo la clase MEG (Íñiguez 2007).

Especie	MEG		Rechazo	
	nº	%	nº	%
<i>Pinus radiata</i>	129	83,3	26	16,7
<i>Pinus sylvestris</i>	107	89,2	13	10,8
<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>salzmannii</i>	102	85,0	18	15,0
Todas	338	85,6	57	14,4

Centrándonos en el abeto blanco, el estudio realizado por Badía y Broto (Badía 1999, Broto 2001) sobre probetas de madera del Alto Garona de tamaño estructural, de las que sólo 50 tenían un espesor inferior a 70 mm, muestra unos primeros resultados de rendimiento. Se aplicaron cinco normas de clasificación: la escandinava INSTA 142:1994 la española UNE 56544:1996, la francesa NFB 52001:1996, la neozelandesa NZ S 3631: 1989 y el método KAR (Knot Area Ratio). En la Tabla 3.11 se ofrecen los resultados.

Tabla 3.11 Rendimiento de diferentes normas para el abeto blanco (Badía 1999)

INSTA	RECHAZO	T0	T1	T2	T3
	17%	43%	20%	14%	6%
UNE	RECHAZO	ME - 2	ME - 1		
	67%	27%	6%		
NFB	RECHAZO	ST - III	ST - II	ST - I	
	54%	14%	24%	8%	
NZ S	RECHAZO	FRAM. Nº 2	FRAM. Nº 1	ENG.	
	22%	15%	46%	17%	
KAR	RECHAZO	S - 6	S - 8	S - 10	
	48%	6%	25%	21%	

Como se aprecia en la Tabla 3.11, sólo dos normas ofrecen un rendimiento aceptable, comparable a los resultados de Íñiguez 2005 y 2007 con clase visual MEG. La norma española UNE 56544 tiene un rendimiento cualitativamente similar al obtenido por Íñiguez en 2007, lo cual pone de manifiesto la mejoría que supone una clase visual MEG con criterios adaptados a la gran escuadría.

Duclós también con abeto blanco en este caso de Huesca, en los Pirineos Centrales (Duclós 2008), aplicó las normas española UNE 56544:2007 y francesa NFB 52001:1998. Las probetas empleadas eran de pequeña escuadría, con un espesor de 30mm. Los resultados se muestran en la Tabla 3.12, con un rendimiento razonable.

Tabla 3.12. Rendimiento de la clasificación de abeto blanco (Duclós 2008)

UNE	RECHAZO	ME - 2	ME - 1
	19%	45%	36%
NFB	RECHAZO + ST - III	ST - II	ST - I
	24%	55%	21%

3.7.2 Otros métodos de clasificación

El objetivo de la clasificación, como se ha mencionado anteriormente, es el de definir un población lo más homogénea posible desde el punto de vista del comportamiento mecánico. Para ello se realizan mediciones de variables relacionadas con la resistencia como parámetro principal desde un punto de vista estructural, y con la rigidez, el otro factor decisivo. Cada una de las variables necesita normalmente una metodología propia. La aparición de nuevos métodos de clasificación viene muchas veces ligada al desarrollo de una metodología y la tecnología asociada.

Es importante resaltar que algunos de estos métodos, a diferencia de la clasificación visual, sí permiten hacer la predicción de la resistencia real de una pieza concreta, con una exactitud razonable.

A continuación se recogen sucintamente algunos de estos métodos de clasificación.

Clasificación mecánica

La clasificación mecánica se basa en la medición de un parámetro mecánico que esté relacionado con la resistencia.

El más antiguo con aplicación comercial se basa en obtener una medida del módulo de elasticidad longitudinal. Este método, usado para clasificación comercial desde hace décadas, es el más empleado junto a la clasificación visual. El principio de clasificación es sencillo: aplicar una carga y medir la deformación, que está fuertemente ligada con las propiedades resistentes. En la aplicación comercial esta clasificación se usa con máquinas de forma automatizada, con la flexión aplicada en el eje débil, flexión de cara. En la Figura 3.10 se muestra una de las máquinas usadas para clasificación mecánica. Habitualmente se emplea una clasificación visual simplificada combinada con la clasificación mecánica.

Figura 3.10 Clasificadora mecánica automática Cook-Bolinder (Carballo 2009)



El mismo principio se puede aplicar con flexión en el eje fuerte, flexión de canto, que presenta mejores resultados de correlación aunque de mucha mayor dificultad de aplicación, sobre todo con gran escuadría.

Hay una serie de métodos mecánicos basados en la medición de la densidad. Un inconveniente común a estos métodos es que la estimación de la densidad se tiene que realizar de forma local. De este modo, aunque la correlación de la densidad con la resistencia es muy alta, es difícil evaluar la resistencia de la pieza por no conocer la densidad en todos los puntos y no incorporar la influencia de los defectos. Por ello se emplean más en diagnóstico de elementos en obra o como técnicas complementarias de clasificación que para clasificación comercial de madera.

Entre estos métodos está el resistógrafo, un taladro mecánico que realiza una perforación y mide la resistencia que ofrece a la perforación. Es útil como método de comparación de densidades pero es difícilmente aplicable a la obtención de valores absolutos de resistencia.

El sondeo con penetrómetro consiste en aplicar una carga de muelle conocida a un émbolo son un elemento punzante que se clava en la madera con profundidad variable dependiendo de la densidad. La evaluación de la densidad local es objetiva y relativamente precisa. Un sistema similar, pero menos útil en el caso de la madera, es el esclerómetro, aparato que en vez de lanzar contra la superficie del objeto un punzante lanza un objeto como que mide la dureza superficial.

Finalmente, tenemos el método de arranque de tornillo, que consiste en extraer, aplicando una carga normal a la superficie, un tirafondos atornillado en la madera. La fuerza necesaria para extraer el tornillo está directamente relacionado con la dureza en la zona de anclaje.

De acuerdo a los trabajos de Íñiguez, de los métodos mecánicos de evaluación de la densidad, el que ofrece una mayor predicción es el de arranque de tornillo ($R^2 = 0,64$) seguido del penetrómetro ($R^2 = 0,59$) (Íñiguez 2007). Según Montón (Montón 2012), el orden de mejores predicciones es el mismo, arranque de tornillo ($R^2 = 0,53$) y penetrómetro ($R^2 = 0,31$).

Clasificación por la velocidad de transmisión de las ondas

Estos métodos se basan en la relación entre la velocidad de propagación de las ondas por un cuerpo y las propiedades de dicho cuerpo. En concreto la velocidad de transmisión está relacionada con la densidad y con el módulo de elasticidad en la dirección de avance de la onda. De esta manera se puede obtener el módulo de elasticidad longitudinal, que se denomina dinámico para diferenciarlo del obtenido mediante el ensayo mecánico de caracterización de la madera regulado por UNE-EN 408. La expresión usada es $E_{\text{din}} = \rho V^2$, con ρ la densidad y V la velocidad de propagación.

Este método de clasificación se aplica tanto con ondas sónicas (frecuencias audibles para el oído humano, entre 20 Hz y 20 kHz) como ultrasónicas (con

frecuencia mayor de 20 kHz). Ambos métodos son similares y la diferencia radica principalmente en la capacidad para recorrer la distancia entre los sensores emisor y receptor y sortear los defectos, mayor en las frecuencias más bajas, pero a cambio de perder sensibilidad.

El método operativo es el mismo, con un emisor que aplica una onda sónica o ultrasónica, y un receptor que registra su llegada, midiendo el tiempo de transmisión. Conocida la distancia se obtiene la velocidad, y sabiendo la densidad, se obtiene el módulo de elasticidad longitudinal dinámico.

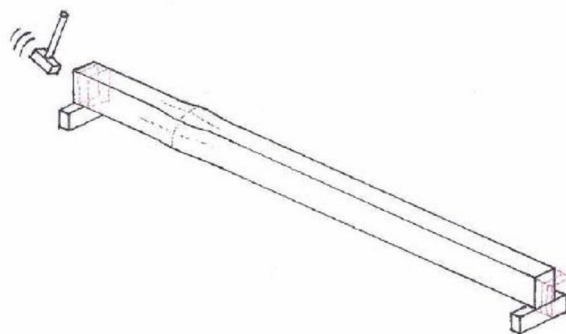
Puesto que, como se ha comentado, la velocidad de propagación también está influida por los defectos que presenta la madera puesto que la onda debe sortearlos, el ajuste para la obtención del módulo de elasticidad no es muy bueno en calidades medias y bajas. Sin embargo a la vez esto lo convierte en un método sintético ya que integra las dos informaciones más importantes, el comportamiento de la madera en sí y la existencia de defectos. De esta manera, con modelos algo más complejos, se puede obtener una buena predicción de las propiedades resistentes de una pieza de madera. Se abre así una buena oportunidad para métodos comerciales de clasificación automáticos, con equipos muy económicos y suficiente capacidad predictiva, que se puede combinar con clasificación visual. El control de calidad, además del análisis de estructuras existentes, son campos también adecuados para esta técnica.

Clasificación por análisis de vibraciones

La frecuencia natural de vibración de una pieza está relacionada con la densidad y con el módulo de elasticidad en la dirección de vibración. Así la frecuencia de vibración longitudinal está relacionada con el módulo de elasticidad longitudinal. También se puede medir la frecuencia de vibración transversal y en torsión, aunque la longitudinal es la más utilizada.

El método operativo consiste en provocar la vibración de la pieza de madera con un golpe. Tal como se ve en la Figura 3.11 en el que se representa la vibración longitudinal.

Figura 3.11. Vibración longitudinal (Íñiguez 2007).



Estos métodos de análisis de vibraciones realizan también una medición sintética de la pieza, ya que también incluyen el efecto de las singularidades

contenidas por la pieza. Constituyen así, al igual que los métodos basados en la velocidad de transmisión de las ondas, una oportunidad para la clasificación automática con equipos de bajo coste.

3.8. Asignación clase resistente

Todo el proceso de caracterización acaba con la asignación de la clase resistente a la población definida por la clasificación, cualquiera que sea el método empleado. Se ha ensayado la muestra de la población y se conocen sus propiedades, pero la normativa europea ha fijado un sistema de clases resistentes, contenido por la norma UNE-EN 338, para simplificar el manejo de los datos. Así para cada población no tenemos que incluir todos los datos de resistencia a los diferentes esfuerzos, módulos de elasticidad, etc, sino que con una única denominación recogemos toda la información. De esta manera además, se permite a los técnicos calcular las estructuras sin reparar ni en la especie, ni en el método de clasificación, ni en ninguna otra circunstancia, salvo la elección de la clase resistente que, eso sí, debe existir en el mercado.

La asignación de una población, una clase visual de abeto español por ejemplo, a una clase resistente, se realiza de acuerdo a UNE-EN 338. Para obtener la asignación, los valores característicos de resistencia a flexión y de densidad (obtenidos con el 5º percentil) deben ser iguales o mayores que los de la clase resistente, y el valor característico del módulo de elasticidad longitudinal (obtenido como valor medio) debe ser igual o mayor al 95% del valor de la clase resistente.

La elaboración de cualquier nueva clase, bien sea visual, mecánica o acústica, implica la realización de nuevos ensayos para poder realizar la asignación de clase resistente.

Las clases resistentes para las coníferas tienen una denominación muy sencilla. Una C y un número que representa la resistencia característica a flexión en N/mm^2 . Así C22 es la clase resistente de una conífera, el abeto blanco por ejemplo, con una resistencia característica a flexión de 22 N/mm^2 .

En el caso de la clasificación visual, a la clase visual establecida, que define como hemos visto una población, se le asigna, de acuerdo a los ensayos realizados a una muestra representativa de esa clase visual, una clase resistente.

La clasificación visual además de un buen rendimiento debe permitir la asignación a una clase resistente lo mayor posible. Los estudios mencionados en el apartado 3.7 para el abeto blanco también proporcionaron resultados en este sentido.

Badía (Badía 1999) obtuvo los valores característicos para las variables que se utilizan para la asignación de clase resistente, la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad longitudinal y la densidad. Se muestran, en la Tabla 3.13, los valores característicos para las clases visuales de las normas enumeradas en el apartado 3.7: la escandinava INSTA 142:1994 la española UNE 56544:1996,

la francesa NFB 52001:1996, la neozelandesa NZ S 3631: 1989 y el método KAR (Knot Area Ratio)

Tabla 3.13. Valores característicos para las diferentes clases visuales de abeto blanco (Badía 1999)

		RECHAZO	T0	T1	T2	T3
INSTA	<i>Resistencia a flexión N/mm²</i>	14,43	19,88	14,07	29,03	29,38
	<i>Módulo de elasticidad paralelo medio N/mm²</i>	17.393	14.644	13.241	17.464	19.889
	<i>Densidad Kg/m³</i>	407,37	399,94	385,32	382,02	398,9
		RECHAZO	ME - 2	ME - 1		
UNE	<i>Resistencia a flexión N/mm²</i>	17,92	20,45	28,18		
	<i>Módulo de elasticidad paralelo medio N/mm²</i>	15.253	16.096	20.001		
	<i>Densidad Kg/m³</i>	390,5	374,77	400,88		
		RECHAZO	ST - III	ST - II	ST - I	
NFB	<i>Resistencia a flexión N/mm²</i>	14,29	28,92	21,78	31,10	
	<i>Módulo de elasticidad paralelo medio N/mm²</i>	15.728	13.155	15.886	18.303	
	<i>Densidad Kg/m³</i>	393,87	414,62	375,08	395,77	
		RECHAZO	FRAM. Nº 2	FRAM. Nº 1	ENG.	
NZ S	<i>Resistencia a flexión N/mm²</i>	14,21	13,68	20,89	30,10	
	<i>Módulo de elasticidad paralelo medio N/mm²</i>	17.155	12.330	15.771	17.397	
	<i>Densidad Kg/m³</i>	406,32	388,21	380,40	391,50	
		RECHAZO	S - 6	S - 8	S - 10	
KAR	<i>Resistencia a flexión N/mm²</i>	19,92	27,36	13,99	30,52	
	<i>Módulo de elasticidad paralelo medio N/mm²</i>	16.075	15.797	15.312	16.950	
	<i>Densidad Kg/m³</i>	391,32	379,18	374,17	399,19	

Del mismo modo tenemos los resultados de Duclós, también para el abeto blanco y las clases visuales de las normas española UNE 56544:2007 y francesa NFB 52001:1998 (Duclós 2008). Los resultados se presentan en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Valores característicos para las diferentes clases visuales de abeto blanco (Duclós 2008)

		FUERA	ME - 2	ME - 1
UNE	<i>Resistencia a flexión N/mm^2</i>	15,11	19,25	20,71
	<i>Módulo de elasticidad paralelo medio N/mm^2</i>	10.012	10.530	11.387
	<i>Densidad Kg/m^3</i>	0,40	0,39	0,39
		FUERA	ST - II	ST - I
NFB	<i>Resistencia a flexión N/mm^2</i>	14,99	20,20	20,62
	<i>Módulo de elasticidad paralelo medio N/mm^2</i>	10.132	10.676	11.599
	<i>Densidad Kg/m^3</i>	0,40	0,39	0,40

La asignación de clases resistentes para estos valores característicos dan los resultados que se muestran en las Tablas 3.15 y 3.16.

Tabla 3.15. Asignación de clase resistente para las diferentes clases visuales de abeto blanco (Badía 1999)

Norma de clasificación visual	Clases resistentes								
	No estructural	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35
INSTA		T1		T0			T2 T3		
UNE				ME-2			ME-1		
NFB				ST-II			ST-III	ST-I	
NZS	FRAM N°2			FRA M N°1				ENG.	
KAR	S-8						S-6	S-10	

Tabla 3.16. Asignación de clase resistente para las diferentes clases visuales de abeto blanco (Duclós 2008)

Norma de clasificación visual	Clases resistentes								
	FUERA	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30
UNE				ME-2	ME-1				
NFB					ST-I ST-II				

Los resultados de la Tabla 3.15 reflejan una buena distribución de clases resistentes, bastante coherente para las diferentes normas, y que sitúan el valor estimativo para una única clase en el C22.

Por último, en la Tabla 3.17 se ofrecen las clases resistentes asignadas por las diferentes normas europeas (el Anexo 2 contiene la relación de las normas) a las clases visuales de abeto blanco de las diferentes procedencias, extraídas de UNE-EN 1912. Al igual que con los resultados de Badía (Badía 1999), el baricentro parece estar situado en una C22, que podría ser el valor esperado para una clase visual única.

Tabla 3.17. Asignación de clase resistente para las clases visuales de las diferentes normas europeas de acuerdo con UNE-EN 1912

País de la Norma	Procedencia	Clase visual	Clase resistente
Francia	Francia	ST-I	C30
Alemania, Austria y R. Checa	Centro, Norte y Este de Europa	S13	
Países Nórdicos	Norte y Nordeste de Europa	T3	
Países Bajos	Norte y Nordeste de Europa	T3	
Francia	Francia	ST-II	C24
Alemania, Austria y R. Checa	Centro, Norte y Este de Europa	S10	
Italia	Italia	S2 y mejor	
Países Nórdicos	Norte y Nordeste de Europa	T2	
Eslovenia	Eslovenia	S10	
Países Bajos	Norte y Nordeste de Europa	T2	
Reino Unido	Centro, Norte y Este de Europa	SS	C18
Francia	Francia	ST-III	
Italia	Italia	S3	
Países Nórdicos	Norte y Nordeste de Europa	T1	
Países Bajos	Norte y Nordeste de Europa	T1	C16
Alemania, Austria y R. Checa	Centro, Norte y Este de Europa	S7	
Reino Unido	Centro, Norte y Este de Europa	GS	
Eslovenia	Eslovenia	S7	C14
Países Nórdicos	Norte y Nordeste de Europa	T0	
Países Bajos	Norte y Nordeste de Europa	T0	

4 Medios y equipos utilizados

4.1 Laboratorios de ensayo y equipo humano

Los trabajos experimentales necesarios para el desarrollo de esta tesis se realizaron en tres laboratorios diferentes, como resultado de iniciativas diferentes y en tres momentos diferentes.

El primero de ellos, cronológicamente, es el trabajo desarrollado en Laboratorio de Maderas del *Departament d'Enginyeria Agroforestal* de la *Universitat de Lleida* (UdL), situado en la *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària* (ETSEA) en Lleida.

El equipo estuvo formado por profesores, Antonio Villasante y el propio autor, y alumnos que realizaron su proyecto final de carrera bajo la dirección del autor, Mike Badia, Jordi Civit e Iñigo Lizarralde. Se contó con el apoyo técnico y la financiación de Maderas Safont Pedarròs de Bossosts, en el Valle de Arán, Lleida

El segundo trabajo fue realizado en el laboratorio de *l'Institut Català de la Fusta* (INCAFUST) con sedes en Lleida, en el Parque Científico y Tecnológico Agroalimentario, y Solsona. Se contó con la colaboración de Maderas Sebastià, en Rialp, Pallars Sobirà, Lleida.

El equipo de trabajo estuvo compuesto por personal investigador de INCAFUST, Jordi Gené y Eduard Correal.

El tercer trabajo fue llevado a cabo en el laboratorio de la Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León (Cesefor) situado en Soria. Se contó con el apoyo de los aserraderos Serrería Sanz Hermanos en Burgi y Maderas Jimeno en Pamplona, y el apoyo y la financiación del Gobierno de Navarra (Departamento de Medio Ambiente).

El equipo de trabajo estuvo formado por personal técnico de Cesefor, José Luis Villanueva, Edgar Lafuente y Sergio Gil, junto con el autor.

4.2 Equipamiento principal de ensayos

El equipo utilizado para los ensayos es similar, aunque varían marcas y especificaciones.

Los ensayos mecánicos se realizaron en pórticos de ensayo equipados con célula de carga de compresión y extensómetros LVDT (Linear Variable Displacement Transducer), con lectura directa mediante ordenador.

En el caso de de la UdL se trata de un pórtico diseñado por personal de la UdL con célula de carga Mutronic con capacidad para 15.000 kp, dos extensómetros y la adquisición de datos de National Instruments, gestionada por el programa Lab View también de National Instruments. Se recogen de

forma simultánea, con velocidad de adquisición programable, los datos de la célula de carga y de los dos extensómetros.

En el caso de INCAFUST los ensayos se realizaron con un pórtico electromecánico de la marca Hoytom modelo CM-DF 300/A1500. El pórtico está equipado con cuatro células de carga que trabajan de forma simultánea, lo que le confiere gran precisión pese a tener una capacidad máxima de rotura de 30.000 kp. La máquina recoge mediante un ordenador los datos de carga y deformación de forma simultánea desde el inicio del ensayo hasta el momento de la rotura. El programa informático controla los parámetros de ensayo y gestiona la adquisición de los datos. En la Figura 4.1 se muestra una imagen general del pórtico de ensayos

Figura 4.1 Pórtico de ensayos del laboratorio INCAFUST



En el caso de Cesefor se trata de un pórtico de ensayos oleohidráulico SITENOR2001 con célula de carga DSEUROPE con una capacidad de carga de 50.000 kp con lectura en compresión, tracción y ciclos. La toma de datos se hace directamente en el ordenador. La gestión del ensayo se realiza mediante programas incorporados por el fabricante, que controlan los parámetros del ensayo y la adquisición de datos simultánea de carga y deformación en dos puntos con extensómetros, además de sensor de posición del pistón. Tiene velocidad de adquisición variable para todos los sensores. En la Figura 4.2 se ofrece una vista general del marco de ensayos.

La calibración se realiza en todos los casos, y tanto para la célula de carga como para los extensómetros, con medida directa en el programa de gestión de ensayos, anualmente por empresa externa acreditada por ENAC.

Figura 4.2 Pórtico de ensayos del laboratorio Cesefor



4.3 Equipamiento auxiliar

Los tres laboratorios disponen de cámara de acondicionamiento de las probetas, para estabilización del contenido de humedad de forma previa al ensayo. En los tres casos se trata de cámaras aisladas con sensores de temperatura y humedad relativa, vaporizadores, ventiladores, trampillas, entradas de aire caliente y de aire frío. Los diferentes dispositivos se activan para mantener las condiciones de humedad relativa y temperatura fijados por el usuario.

En cuanto al equipo para la medida de las dimensiones de las piezas se usaron flexómetro y escuadra calibrados. Para la medida de las características de cada pieza, como nudos, gemas, etc., y para la medida de las rodajas extraídas tras los ensayos se usaron calibres digitales calibrados.

Para el control de la humedad se usaron xilohigrómetros de conductividad eléctrica, con escala adaptada a la densidad de la madera.

Para el pesado de las rodajas extraídas de la pieza ensayada para el cálculo de la densidad y del contenido en humedad de las probetas ensayadas se usaron balanzas digitales.

Para el secado de las rodajas extraídas de los ensayos para el cálculo del contenido en humedad de las probetas ensayadas se usaron estufas de laboratorio.

La calibración se realiza en todos los casos anualmente por empresa externa acreditada por ENAC.

5 Metodología

5.1 Material de ensayo

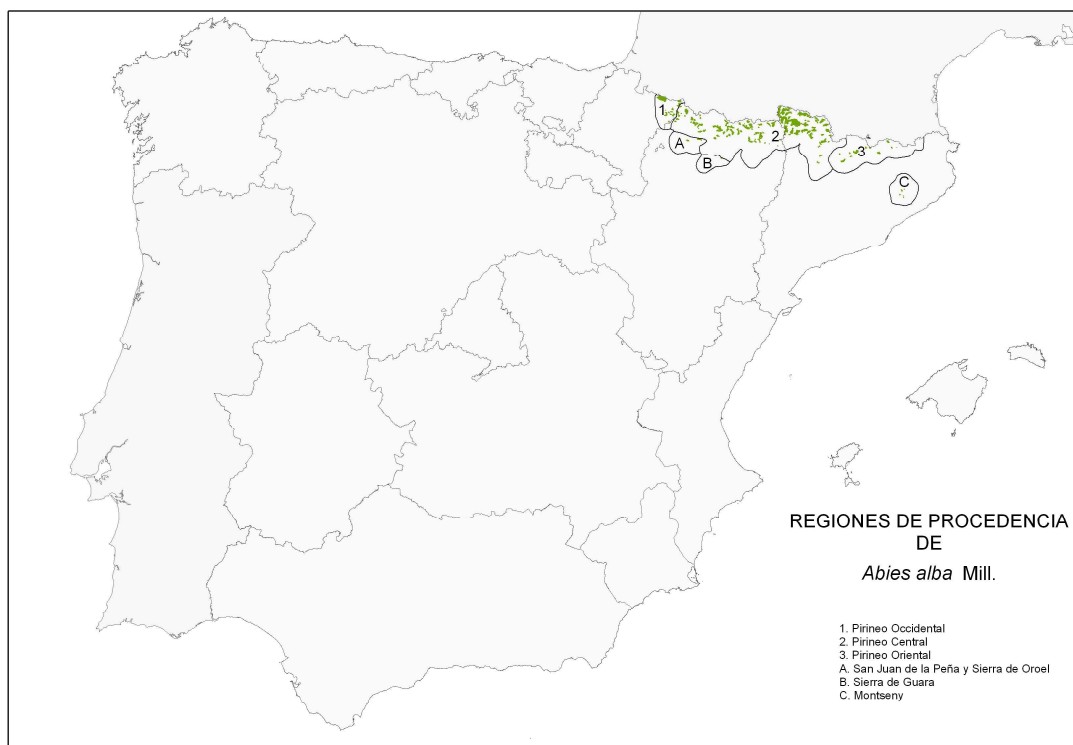
El material de ensayo son probetas de tamaño estructural con dimensiones que van, en ancho, de 120 a 250 mm, y gruesos de 70 a 200 mm, y longitudes de 19 veces el ancho, de acuerdo con la norma UNE-EN 408 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”, a excepción de un lote en el que como se describe más adelante la longitud era inferior y se realizó la corrección correspondiente.

Los elementos se fabricaron y ensayaron en tres momentos diferentes, constituyendo tres grupos identificados, de más antiguo a más moderno, como A, B y C. Esta composición no corresponde a una planificación del experimento sino que se trata de tres iniciativas independientes que se unen en el presente trabajo para construir una caracterización más robusta y aplicable a todo el abeto español.

Parte de la riqueza del trabajo es, como se verá más adelante, comparar diferentes metodologías de muestreo. La unión de los tres Grupos consigue la representatividad del muestreo en la población de la especie, al obtener piezas de Irati, Roncal, Valle de Arán, y Pallars Sobirà, además de piezas obtenidas del departamento francés de Haute Garonne, tal como se describe más adelante.

En la Figura 5.1 se muestra el mapa de las regiones de procedencia del abeto blanco elaborado por el Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente MAGRAMA y publicado en su sitio web (http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/map_Abies_alba_tcm7-285901.jpg, 2015).

Figura 5.1 Mapa de regiones de procedencia del abeto en España



La Tabla 5.1, publicada también por el MAGRAMA en su sitio web http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politicaforestal/desc_Abies_alba_descrip_regiones_tcm7-285843.pdf muestra el porcentaje de la especie que habita en cada región de procedencia.

Tabla 5.1. Datos de las regiones de procedencia del abeto en España

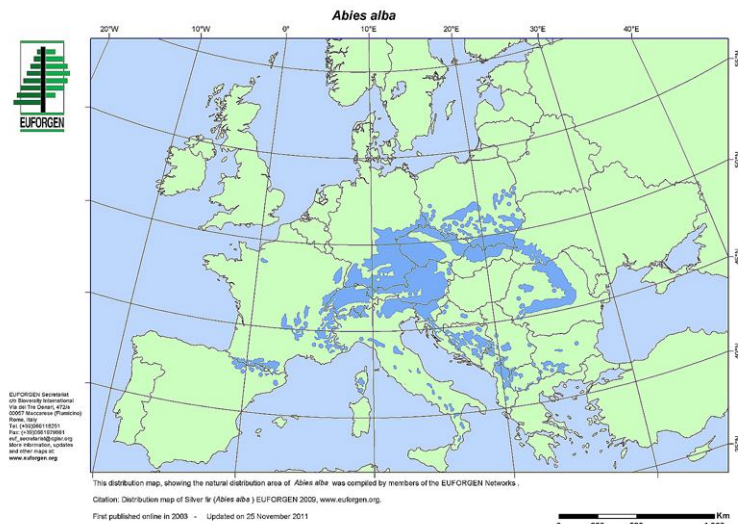
R.P.	Pres. (%)	ALT. (m)			PREC. (mm)		A (meses)	TEMP. (°C)			OSC (°C)	Hs	Tipo de suelo (FAO) (%)
		MED	MAX	MIN	ANUAL	V		MED	MAXMC	MINMF			
1	10,3	1126	1781	662	1580	238	0,0	8,2	23,2	-2,6	15,1	4,0	CMc(100)
2	80,1	1702	2735	731	1238	267	0,0	6,2	21,7	-5,5	16,3	5,8	CMu(45) CMc(22) LPd(17) RK(11)
3	7,3	1642	2476	721	1150	309	0,0	6,9	22,8	-5,6	16,8	5,7	CMu(68) CMc(22)
A	1,3	1319	1595	1050	1037	181	0,0	8,5	25,0	-2,9	17,0	4,2	CMc(71) CMg(29)
B	0,2	1667	1884	1523	1266	211	0,0	7,7	24,1	-3,8	18,1	4,8	CMc(100)
C	0,9	1127	1570	733	993	206	0,0	10,2	25,0	-2,2	16,3	3,0	CMu(100)

Como se aprecia en la Tabla 5.1, el abeto tiene una distribución casi exclusivamente pirenaica (poco más del 2 % ocupa localizaciones ajenas, parte en las sierras exteriores como Peña Oroel/San Juan de la Peña y Guara, y Montseny) y el aprovechamiento comercial se puede afirmar que es 100% pirenaico. Las regiones de procedencia 1 y 2, Pirineo occidental y central respectivamente, suman más del 90 % de la presencia de abeto en España, y es donde se han realizado los muestreos. En la región 1, la zona con mayor densidad es el Pirineo navarro, y en particular Irati y Roncal. En la región 2 la mayor densidad corresponde al Valle de Arán seguido de Pallars Sobirà.

En Francia la población de abeto no es sólo pirenaica, tal como se aprecia en la Figura 5.2

(http://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Documents/Maps/JPG/Abies_alba.jpg)

Figura 5.2. Distribución europea del abeto



Todas las piezas de los tres Grupos han sido seleccionadas en aserradero. No sólo porque de esta manera se consigue una mayor representatividad de la madera estructural de mercado, tal como refleja UNE EN 384, sino también porque uno de los objetivos es testar la clasificación en aserraderos para garantizar su viabilidad comercial. En todos los casos las probetas fabricadas se identificaron con una clave y se marcaron con spray o rotulador grueso cada pieza con la clave asignada para garantizar la trazabilidad, clave que se reflejó posteriormente en cada estadillo de registro de características. Puesto que se trata de tres experiencias diseñadas de forma independiente, la clave es diferente en cada grupo.

5.1.1 Probetas del Grupo A

Un primer grupo de 176 probetas, con sección nominal 145x70 mm que denominamos Grupo A, fue ensayado en la UdL. La madera se obtuvo en el aserradero de Maderas Safont-Pedarrós, empresa que financió el estudio de caracterización estructural de su madera. La procedencia de las probetas es de cuatro localizaciones, cuatro lotes, en el Valle de Arán y en la continuidad del valle en Francia, el departamento Haute Garonne. Estas localizaciones constituyen uno de los núcleos principales del abeto blanco en la región pirenaica que se distribuye por España y Francia, y las del Valle de Arán son de las más importantes de las poblaciones del Pirineo español y por ende de España. En Francia sin embargo hay otras importantes poblaciones no pirenaicas.

Se realizó una elección de fustes al azar en el parque del aserradero entre aquellos destinados a un uso estructural de cada una de las localizaciones de procedencia. Cada fuste se dividió en cuatro trozas de cuatro metros cada una,

seleccionando al azar la troza de la que se extraerían las probetas, con probabilidad proporcional al volumen de cada troza.

Finalmente se establecieron tres zonas concéntricas en cada troza, para garantizar la trazabilidad de la posición de la probeta no sólo en altura (dada por la posición de la troza en el árbol) sino también en diámetro, tal como se aprecia en la Figura 5.3

Figura 5.3. Zonas concéntricas en cada troza (Badía 1998)



El Grupo A, 176 probetas, está constituido por cuatro subgrupos, cada uno de una localización:

1. Procedencia: Bossòst - Arres (Valle de Arán) 51 probetas;
2. Procedencia: Gouaux de Luchon (Francia) 42 probetas;
3. Procedencia: Juzet (Francia) 41 probetas;
4. Procedencia: Sant Paul d'Oueil (Francia) 42 probetas.

Estos lotes, debido a su origen principal Francia y su pequeño tamaño, se utilizarán de dos formas: i) como un lote único del Grupo A para completar la muestra española y obtener la clase resistente de la población Pirineos, que incluye España y Francia y ii) usando los 4 subgrupos como lotes para investigar la manera de incorporar lotes incompletos a una posible clasificación.

5.1.2 Probetas del grupo B

El segundo grupo, Grupo B, ensayado en INCAFUST, está compuesto por un único lote de 150 probetas de procedencia Valle de Arán y Pallars Sobirà, de sección 120x75 mm. Las probetas se obtuvieron del aserradero Maderas Sebastià. Elegidas al azar de entre las piezas producidas por la empresa, no existía trazabilidad de cada pieza, por lo que no se conoce cuantas probetas ni cuales son de una zona u otra, pero se garantiza que pertenecen a una de las dos. Estas probetas del Grupo B pertenecen al núcleo de la Región de procedencia 2

5.1.3 Probetas del grupo C

El grupo C, con 147 probetas, ensayado en Cesefor, está formado por tres lotes procedentes de dos zonas de Navarra, Roncal e Irati, con piezas obtenidas de los aserraderos Serrería Sanz Hermanos y Maderas Jimeno. Se trata de un estudio financiado por el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Navarra.

Todos los lotes contienen probetas de ambas localizaciones, con 111 probetas en total de Irati y 36 de Roncal. Irati y Roncal son los dos núcleos principales, por este orden, de la Región de procedencia 1, y los aserraderos comercializan de forma indistinta y mezclada ambos orígenes. Irati supone el principal punto de suministro de madera de abeto en Navarra. La proporción de piezas de un origen y otro corresponde aproximadamente a la proporción en que se suministran los aserraderos. La selección de los fustes se hizo al azar en el parque de ambas empresas, recogiendo la variabilidad de orígenes y calidades, hasta formar los siguientes lotes:

1. Lote de 49 probetas de dimensiones 150x70 mm;
2. Lote de 49 probetas de dimensiones 160x120 mm;
3. Lote de 49 probetas de dimensiones 250x200 mm.

La formación de los lotes tal como se ha explicado y con la mezcla de los dos orígenes en cada lote en lugar de, por ejemplo, un lote completo de una sección determinada de origen Roncal, supone colocarse, en general, del lado de la seguridad.

Las probetas del Grupo C forman tres subgrupos que, puesto que son de secciones diferentes, se manejarán como tres lotes C.1, C.2 y C.3.

5.2 Líneas generales del desarrollo experimental

El desarrollo experimental, aunque de alguna manera iniciado en la selección de las probetas, se inicia propiamente con la recepción en el laboratorio de las probetas ya identificadas, y es similar en los tres casos. De forma consecutiva consta del registro de las características de las probetas, de la clasificación visual orientativa, del ensayo para obtener las propiedades mecánicas y elásticas, y de las mediciones para determinar las características físicas.

La madera fue secada al aire y posteriormente estacionada en cámara climática en las condiciones establecidas por la norma UNE-EN 408, $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ y $(65 \pm 5)\%$ de temperatura y humedad respectivamente, para alcanzar un contenido de humedad objetivo del 12 %, que no siempre se alcanzó, aplicando

posteriormente las correcciones establecidas por la normativa. El contenido de humedad de la madera fue controlado a través de mediciones con xilohigrómetro en el tercio central de las piezas. Puesto que el objetivo de la medición de humedad en este momento era exclusivamente esperar a realizar el ensayo con una humedad adecuada, se realizó sólo el control de algunas piezas de cada lote; este contenido de humedad no se ha registrado ni se ha utilizado en ningún cálculo ni corrección, a diferencia del contenido de humedad de la rodaja obtenida tras el ensayo y determinado mediante secado en estufa que se utilizó, tal como se explica más adelante, para realizar las normativas correcciones del módulo de elasticidad en flexión y de densidad.

Antes del ensayo de las probetas se realizó un marcado de los puntos principales de cada probeta y un registro de las características visuales definidas previamente por el equipo de trabajo y relacionadas con la resistencia, usadas en las diferentes clasificaciones visuales para uso resistente en distintas normas. En todo caso se han tenido en cuenta las especificaciones establecidas en UNE-EN 14081-1 "Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales". Posteriormente, y de forma inmediata, se realizaron los ensayos para determinar las propiedades individuales, es decir, realizando todo el trabajo en cada probeta antes de pasar a la siguiente probeta, de modo que los datos de humedad son válidos para el registro de características y para los ensayos.

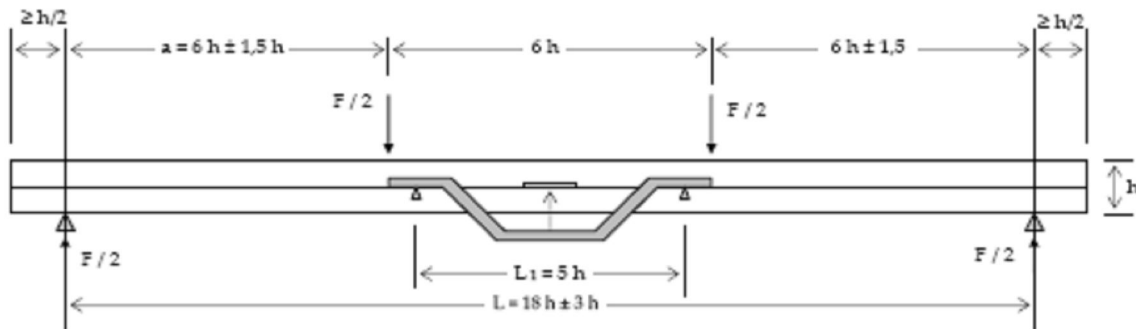
5.2.1 Marcado de puntos principales

El marcado de puntos relevantes de la probeta se inició con el marcado al azar del canto a tracción antes de deshacer el paquete, tal como establece UNE-EN 384 sobre la elección del borde traccionado. Posteriormente, y ya una a una se marcó el centro de la probeta. A partir de ese punto se señalaron el resto de puntos significativos simétricamente respecto del centro, por lo que las distancias se definen respecto a este punto central, en un eje longitudinal, en múltiplos de h , siendo h el ancho nominal de la probeta, o canto en flexión:

1. Posición de las cargas, a una distancia de $3h$, definiendo una zona de longitud $6h$, la zona sometida a momento constante máximo;
2. Posición de los apoyos, cada uno a una distancia de $9h$ del centro, fijando así el valor necesario para el cálculo de las variables mecánicas y elásticas y garantizando el cumplimiento de los requisitos de UNE EN 408;
3. Posición de los apoyos del elemento de sujeción del extensómetro para medición de la flecha relativa del tercio central libre de deformación por cortante. Estos puntos se sitúan a una distancia de $2,5h$ del centro de la probeta en dirección longitudinal y en el centro de la cara ($0,5h$) en dirección transversal.

Estos puntos principales se recogen en la Figura 5.4

Figura 5.4. Configuración del ensayo a flexión y puntos principales UNE-EN 408



5.2.2 Registro de las singularidades de las probetas

Esta fase es esencial no sólo por la necesaria precisión de las mediciones sino porque en este punto quedan cerradas las variables que podrán ser usadas en la clasificación. El objetivo es disponer de los datos necesarios para construir al menos una clase visual, aplicable a la madera de abeto blanco de gran escuadría. En el registro se midieron y anotaron las siguientes variables tanto para el tercio central como para la pieza total:

- Dimensiones reales de la probeta, ancho, grueso y largo;
- Tamaño de nudos aislados en la cara;
- Tamaño de los nudos agrupados en la cara;
- Tamaño de nudos aislados en canto;
- Tamaño de nudos agrupados en el canto;
- Posición de la peor sección por nudos (tercio central);
- Entrecasco, presencia y dimensiones;
- Madera de compresión, presencia y dimensiones;
- Tamaño de los anillos de crecimiento;
- Desviación general de la fibra;
- Bolsas de resina, presencia y dimensiones;
- Longitud, anchura y profundidad de las fendas;
- Presencia de acebolladuras;
- Presencia de medula;
- Presencia y dimensión de las gemas;
- Presencia de pudriciones y/o alteraciones biológicas;
- Deformaciones: alabeo, curvatura de cara y canto, y atejado.

En las probetas ensayadas por INCAFUST no se realizó el registro anterior, sino que se clasificaron directamente las probetas de acuerdo con las especificaciones de calidad de la clase MEG de la norma UNE 56544.

5.2.3 Clasificación visual

La clasificación visual, como se ha indicado en el capítulo 3 es uno de los principales métodos de clasificación de madera para uso resistente, el único usado habitualmente en España, ya que combina sencillez, escasa inversión y eficacia, aunque sea menos eficiente que otros, con mayor dispersión de resistencias en una misma clase. En nuestro caso, y puesto que uno de los objetivos es su evaluación en los aserraderos, es el único método posible ya que no disponen de equipos de clasificación mecánica.

Con la información obtenida en el punto 5.2.2 se realizó una clasificación visual. Se intenta generar una clasificación del abeto blanco lo más armónica posible con otras especies ya caracterizadas, por lo que se han utilizado los criterios de clasificación de la UNE 56544, que en este momento del trabajo se puede considerar únicamente como orientativa, ya que no existe clasificación para la madera española de abeto blanco, y nos permite evaluar resultados para decidir en un paso posterior si se modifican los criterios de calidad.

En este punto aparece una alternativa, usar la clasificación de madera de pequeña escuadría ME1 y ME2, que es para piezas iguales o menores a 70 mm de espesor, o usar los criterios de calidad MEG, establecidos para gran escuadría, piezas de espesor mayor de 70 mm. Para tomar la decisión se han tenido en cuenta los siguientes puntos:

1. No se dispone del número de piezas necesario para obtener dos clases resistentes ME1 y ME2, por lo que o se sacrifica el rendimiento, menor eficiencia (expresada en los términos establecidos en el apartado 6.1) si se clasifica sólo como ME1, o se sacrifica la clase resistente, menor eficacia, si se clasifica como ME2;
2. La creación de una sola clase resistente sin límite de tamaño resulta más difícil de encajar y contrasta con trabajos anteriores;
3. La mínima dimensión representada es 70 mm, no estando representados espesores menores pero sí bastante mayores;
4. 70 mm es un espesor muy habitual para vigas cepilladas de madera de abeto, en aserraderos que comercializan vigas de gran escuadría. Es más lógico que el valor límite sea una medida comercial, si excluimos 70 mm de la gran escuadría en muchos aserraderos el primer valor sería 100 mm;
5. El valor de 70 mm como límite entre pequeña y gran escuadría es puramente convencional. Establecer el límite en 69 mm no produce ninguna diferencia;
6. La aplicación de los criterios de calidad de pequeña escuadría a piezas de gran escuadría ofrece malos resultados (Iñiguez 2007);
7. La aplicación de la clasificación de pequeña escuadría al abeto supone muy escasa diferencia resistente entre ME 1 y ME 2 (Duclós 2008)
8. Las clases visuales no tienen por que ser excluyentes, es decir la clase ME2 y la clase MEG pueden incluir ambas piezas de 70 mm, siempre y cuando no se realicen clasificaciones consecutivas (reclasificación de rechazos por ejemplo). De este modo un aserradero que trabaje con

madera de pequeña escuadría puede incluir los 70 mm y uno que trabaje con gran escuadría también, lo que tiene bastante sentido comercial.

Se ha decidido, evaluando los criterios expuestos, establecer la clase MEG para maderas de espesor igual o superior a 70 mm en el abeto blanco, criterio que en su caso podrá extenderse a otras especies.

En la Tabla 5.1. se muestran los criterios de calidad para la clase MEG establecidos en UNE 56544 y que se han usado para clasificar visualmente las piezas. La norma UNE 56544 establece algunos criterios de clasificación más exigentes, de acuerdo con lo establecido en UNE-EN 14081, cuando la clase resistente sea superior a C18. En nuestro caso se ignora cual va a ser la clase resistente final, pero con un análisis preliminar se prevé que sea superior a C18, por lo que se han aplicado los valores correspondientes a una clase resistente superior a C18.

Tabla 5.2 Especificaciones de la calidad MEG de la norma UNE 56544.

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⁾		
- Pino silvestre		Sin limitación
- Pino laricio		Sin limitación
- Pino gallego y pinaster		Sin limitación
- Pino insigne (radiata)		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.
	- 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		
- longitud		$\leq 1/3$ de "L"
- dimensión relativa		$g \leq 1/3$
MÉDULA ⁽¹⁾		Admitida
ALTERACIONES BIOLÓGICAS		
- Muérdago (<i>V. album</i>)		- No se admite
- Azulado		- Se admite
- Pudrición		- No se admite
- Galerías de insectos xilófagos		- No se admiten
DEFORMACIONES MÁXIMAS ^{(2) (3) (4) (5)}		
- Curvatura de cara		20 (10) mm (para una longitud de 2 m)
- Curvatura de canto		12 (8) mm (para una longitud de 2 m)
- Alabeo		2 (1) mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m)
- Abarquillado		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.		
⁽⁵⁾ Se tomarán los valores más exigentes indicados entre paréntesis, cuando la calidad MEG de lugar a una clase resistente superior a C18		

La norma UNE 56544, como se observa en la Tabla 5.1 no establece limitación en términos absolutos para el tamaño de nudo, limitación que sí establecen otras normas como por ejemplo la francesa NFB 52001. En el presente estudio, se ha decidido incluir una limitación de tamaño máximo para colocarnos del lado de la seguridad. La limitación del tamaño máximo de nudo aislado se ha fijado en 8 cm, por ser el tamaño máximo que está representado. Como el tamaño de la sección a la que se puede aplicar la clasificación no está limitado, se pueden clasificar piezas mucho mayores que las ensayadas, no sería raro de 30 o 40 cm, y por tanto la clasificación podría admitir piezas con nudos muy grandes, de 20 o 25 cm. A medida que aumenta el tamaño del nudo aislado aumenta la desviación local de la fibra hasta incluso los 90°. Esta desviación local es uno de los principales efectos de pérdida de resistencia que provoca el

nudo. Cuanto mayor es el nudo es más probable que la desviación, con ángulo grande, afecte al borde traccionado del elemento. Por ello el efecto del nudo se amplifica mucho en los nudos grandes, con un efecto mayor que el proporcionalmente a la proporción de superficie que ocupa correspondería. En los nudos agrupados, en cambio, no se produce este efecto.

No podemos saber el efecto que tal desviación de la fibra puede causar en nudos tan grandes, pues en la muestra ensayada no hay un número suficiente de probetas con un nudo mayor de 8 cm que permita conocer el comportamiento estructural. Por todo ello y para estar del lado de la seguridad se limitó a este valor de 8 cm el tamaño máximo de nudo aislado admitido.

La aplicación de estos criterios a los diferentes Grupos y subgrupos produjo los siguientes resultados de probetas clasificadas y rendimiento de clasificación.

Para las probetas del Grupo A, 147 probetas clasificadas de 176 (84%):

1. Procedencia: Bossòst - Arres (Val d'Aran) 36 de 51 probetas, 71%;
2. Procedencia: Gouaux de Luchon (Francia) 37 de 42 probetas, 88%;
3. Procedencia: Juzet (Francia) 35 de 41 probetas, 85%;
4. Procedencia: Sant Paul d'Oueil (Francia) 39 de 42 probetas, 93%.

Para las probetas del Grupo B:

1. 81 de 150 probetas, 54%.

Para las probetas del Grupo C, 138 probetas clasificadas de 147 (94%):

1. Lote de 49 viguetas de dimensiones 150x70 mm 47 de 49 probetas, 96%. 11 probetas de Roncal y 36 probetas de Irati;
2. Lote de 49 vigas de dimensiones 160x120 mm 47 de 49 probetas, 96%. 12 probetas de Roncal y 35 probetas de Irati;
3. Lote de 49 vigas de dimensiones 250x200 mm 44 de 49 probetas, 90 %. 11 probetas de Roncal y 33 probetas de Irati.

En cuanto a la procedencia Irati/Roncal, el rendimiento es el mismo en ambas, un 94 % que corresponde naturalmente con el rendimiento medio.

Como se aprecia los resultados son prometedores para establecer la clasificación MEG de UNE 56544 como criterio de clasificación visual para uso resistente de la madera de abeto de España. La madera del Grupo B es la que menor rendimiento tiene en la clasificación. Este rendimiento supone una eficiencia no admisible desde un punto de vista comercial, pero corresponde con una menor selección previa de los fustes destinados a uso estructural en el aserradero, tal como se comenta en el próximo capítulo, por lo que se mantiene la posibilidad comercial de uso de la clasificación.

5.2.4 Ensayos

Se realizaron, para cada probeta de forma inmediata al registro de sus características, los ensayos para el cálculo de las variables mecánicas, resistencia a flexión, y elásticas, el módulo de elasticidad longitudinal local en flexión (en adelante módulo de elasticidad local o MOE), ambos de acuerdo a UNE-EN 408, y propiedades físicas, humedad de acuerdo a UNE-EN 13183-1, y densidad de acuerdo a UNE-EN 408.

5.3 Determinación de las propiedades mecánicas y elásticas

Se realizaron los ensayos necesarios para poder efectuar una asignación de la calidad visual que se proponga a una clase resistente. De acuerdo a UNE-EN 338 "Madera estructural. Clases resistentes", en este apartado es necesario obtener el valor característico de la resistencia a flexión y el valor medio del módulo de elasticidad local. Para ello es preciso ejecutar los ensayos para obtener los valores individuales, tensión de rotura y módulo de elasticidad local, de cada probeta de acuerdo a UNE-EN 408. A pesar del uso habitual en la actualidad del módulo de elasticidad global (es decir considerando la deformación de la probeta entre apoyos en lugar de entre cargas) y puesto que parte de los ensayos realizados (en particular los del Grupo A) lo fueron antes de introducir en la normativa las referencias al módulo de elasticidad global, éste no fue obtenido en esos casos. Por ello se ha mantenido el criterio de uso del módulo local en lugar del módulo global, aspecto plenamente aceptado por la normativa.

5.3.1 Módulo de elasticidad local

El procedimiento de ensayo se realiza de acuerdo a lo establecido en UNE-EN 408 y que se ha mostrado en la Figura 5.4, que consiste en la aplicación de dos cargas simétricas sobre la probeta simplemente apoyada, separadas una distancia de $6h$, siendo h el canto en flexión tal como aparece en la mencionada figura. De esta forma la zona ubicada entre las cargas tiene un momento constante y un cortante nulo y no se producen deformaciones debidas al mismo, por lo que se puede calcular el módulo de elasticidad en flexión pura. La disposición del ensayo está perfectamente definida en UNE-EN 408 para evitar que la influencia de variables como la luz total de la pieza pueda distorsionar resultados.

En el caso de las probetas del grupo A, la longitud de algunas es inferior a $19h$, por lo que se modificó el vano en flexión que tomó un valor diferente del $18h$ que marca la Figura 5.4, por lo que se modificó también la distancia entre cargas establecida en $6h$, aumentándola de modo que se mantenía en la unidad el coeficiente definido en UNE-EN 384, k_1 .

$$k_1 = \left(\frac{l_{es}}{l_{et}} \right)^{0,2} \quad (5.1)$$

Con $l_{et} = l + 5 a_f$, l y a_f los valores reales en el ensayo de la separación entre apoyos y cargas respectivamente

Este coeficiente evita distorsiones en los ensayos debidos a la influencia de la longitud del vano y de la longitud con carga máxima, ya que la presencia de pequeñas irregularidades no consideradas es más probable cuanto mayores sean ambos valores. Al mantener el valor del coeficiente en uno, se considera el mismo efecto.

Se aplica la carga a velocidad constante y se va registrando el valor de dicha carga y el desplazamiento vertical que se produce en la fibra neutra en el centro de la probeta con respecto a dos puntos de la fibra neutra a distancia $\pm 2,5h$ del centro, es decir la flecha relativa de los 5h centrales de la probeta. Se han registrado los valores de deformación en uno de los lados de la probeta. La relación entre carga y deformación permite calcular el módulo de elasticidad de acuerdo con la norma UNE-EN 408:

$$E_{loc} = \frac{aL_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (5.2)$$

Donde:

E_{loc} : Módulo de Elasticidad local en flexión (N/mm^2);

a: distancia entre un punto de carga y el apoyo (mm);

L_1 : longitud base de medida de la deformación (mm), 5h en este caso;

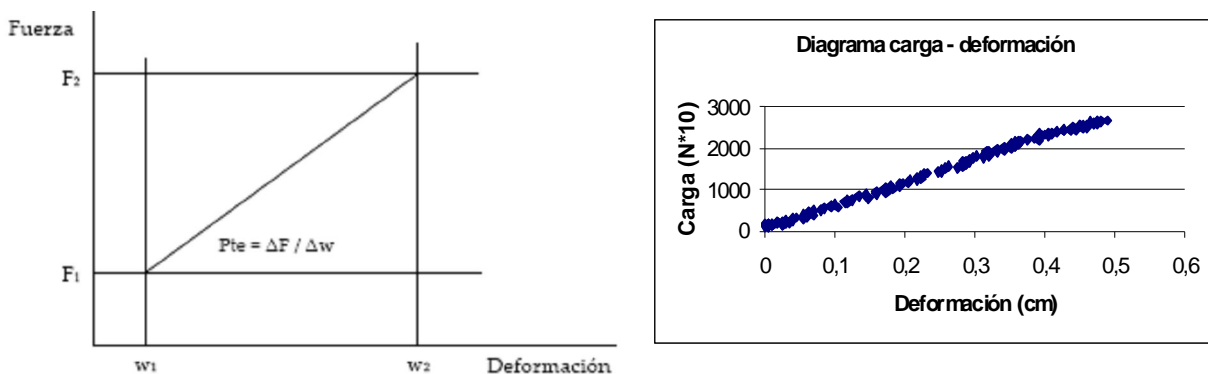
F_2-F_1 : incremento de carga (N);

I: momento de inercia (mm^4);

w_2-w_1 : incremento de deformación correspondiente a F_2-F_1 (mm).

Esta ecuación se aplica únicamente en el tramo elástico, que en el diagrama fuerza/deformación corresponde a un tramo recto. Por ello en la ecuación el término $(F_2 - F_1) / (w_2 - w_1)$ se puede sustituir por la pendiente de la recta de regresión, siempre que se garantice un coeficiente de correlación de al menos un 99%, tal como se muestra en la Figura 5.5.

Figura 5.5. Diagrama fuerza deformación



Se toma el tramo más largo posible que cumpla este requisito entre el 10 y el 40% de la carga máxima (carga de rotura), y siempre incluyendo el tramo entre el 20 y el 30 % de la carga máxima.

El módulo de elasticidad varía con la humedad de la madera, y puesto que la humedad de referencia para los valores característicos es del 12 % es necesario corregir el valor del ensayo a dicha humedad si la de la pieza ensayada es diferente. De acuerdo a UNE-EN 384, se aumenta un 1 % el valor del módulo por cada 1 % de exceso de humedad respecto al 12 %, y se reduce en la misma proporción en caso de defecto de humedad, en el rango del 10 al 18%. Si la humedad de la probeta es superior al 18 % la corrección se realiza hasta el 18 %, quedando sin corrección el exceso, lo cual queda del lado de la seguridad, estimando un módulo de elasticidad menor al real.

En las siguientes imágenes, Figura 5.6, se muestra la evolución del ensayo de una probeta de elevada calidad, en el que el tramo no elástico ocupa una extensión significativa, con elevadas deformaciones antes de la rotura que se produce a una elevada carga.

Figura 5.6 Imágenes del ensayo de una probeta de alta calidad



5.3.2 Tensión de rotura a flexión

La obtención de la tensión de rotura de cada probeta, necesaria para calcular el valor característico de resistencia a flexión, se realiza en un ensayo con la misma disposición que el descrito para el módulo de elasticidad. Se ha realizado el ensayo hasta rotura de todas las piezas. El ensayo ha sido la

continuación del ensayo de obtención del módulo de elasticidad, sin descargar la probeta.

La tensión de rotura se calcula de acuerdo con la ecuación 5.3.

$$f_m = \frac{a F_{\text{máx}}}{2W} = 3aF_{\text{máx}}/(bh^2) \quad (5.3)$$

Donde:

f_m : tensión de rotura en flexión paralela a la fibra (N/mm²);

a: distancia entre un punto de carga y el apoyo (mm);

$F_{\text{máx}}$: carga máxima (N);

W: módulo resistente de la sección (mm³);

b: grueso de la pieza (mm);

h: ancho de la pieza, canto en flexión (mm).

Tras la rotura se identifica el motivo de la rotura y se caracteriza, tanto tamaño y posición de los defectos de la madera como la forma de rotura.

Se tuvieron únicamente en cuenta las probetas cuya rotura se produjo en el tercio central, ya que hay dificultad para conocer donde se inicia realmente la rotura, y por tanto cual es el momento flector que existe en el punto de rotura y por ignorar la influencia del cortante en el inicio de la rotura, mayor cuanto más próximos a los extremos.

El valor de tensión de rotura se corrigió para ajustarlo al valor de referencia del canto en flexión, 150 mm, mediante el siguiente coeficiente, de acuerdo a UNE-EN 384, para poder obtener el valor característico de cada lote.

$$k_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}$$

5.4 Determinación de las propiedades físicas

Se obtuvo, para cada probeta, el valor individual de las propiedades físicas necesarias para la asignación de la clase resistente de acuerdo a UNE-EN 338: la densidad (que permite obtener la densidad característica), y el contenido en humedad (necesario para asegurar la validez de los ensayos y corregir los valores de densidad y módulo de elasticidad).

5.4.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad de las probetas se calculó de acuerdo con UNE-EN 408 una vez finalizado el ensayo de flexión de cada probeta, extrayendo inmediatamente una rebanada, libre de nudos y bolsas de resina, de la sección completa y lo más próxima posible a la sección de rotura.

La humedad se obtuvo de acuerdo con UNE-EN 13183-1, mediante secado en estufa. Se extrajo la rebanada de cada probeta, se identificó con el número de la probeta, se pesó y se midieron las tres dimensiones. Tras el secado en estufa se pesó la rodaja seca y se calculó el contenido de humedad. También se midieron las dimensiones de la rodaja seca para el cálculo de la densidad.

En la Tabla 5.3 se muestra el contenido medio en humedad de cada uno de los centros de ensayos.

Tabla 5.3. Contenido en humedad de los lotes

Grupos	Contenido de humedad (media) %	CV %
A	17,71	26,28
B	12,79	2,70
C	17,71	21,41

5.4.2 Densidad

Se obtuvo el valor de densidad de cada probeta de acuerdo a UNE-EN 408, usando los datos obtenidos en el proceso de cálculo de humedad, es decir, el peso antes del secado y las dimensiones de la probeta que permiten obtener su volumen, obteniendo así la densidad a la humedad de ensayo. Del mismo modo se calculó la densidad anhidra. Finalmente, se corrigió el valor de la densidad de la probeta para referirlo al 12% de humedad de acuerdo con UNE-EN 384, que permite obtener el valor característico de densidad del lote. Como las probetas tienen un contenido en humedad diferente del 12 %, se aplica la corrección de reducir la densidad un 0,5 % por cada 1 % de exceso de humedad para probetas con humedad superior al 12 %, y aumentando la densidad en la misma proporción en caso de probetas de humedad inferior al 12%. Este valor completa los necesarios para la asignación de clase resistente de acuerdo a UNE-EN 338.

6 Análisis y discusión de resultados

6.1 Eficiencia de la clasificación

Todas las probetas han sido clasificadas, tal como se ha descrito en el capítulo 5, de acuerdo a los criterios de clasificación establecidos para la clase visual MEG de la norma UNE 56544 y que aparecen en la Tabla 5.1. Aunque esta clasificación no es aplicable actualmente al abeto blanco, se ha usado como punto de partida. Ahora se trata de analizar si la eficiencia, que podemos definir como la proporción de madera que es clasificada como MEG en relación al conjunto de la madera cuyo destino más valioso es el uso estructural, es aceptable, de manera que la clasificación sea rentable, con unos criterios sencillos y rápidos de aplicar como son los de la calidad MEG. El sentido de la eficiencia es valorar la pérdida de valor en la producción por usar una clasificación que no consigue aprovechar la madera que no tiene otros usos valiosos. La eficiencia va variando con el tiempo, pues depende del resto de usos que haya, de modo que pueden aparecer destinos valiosos que ocupen parte de la madera estructural, o al contrario, desaparecer o disminuir productos más valiosos de manera que la madera estructural tenga que aprovecharlos como más valiosos, como ha pasado en algunas zonas con la madera de carpintería.

La eficiencia se va a evaluar a través del rendimiento de la clasificación que se ha realizado, es decir, cuantas piezas de las inicialmente seleccionadas son finalmente clasificadas para uso estructural, en este caso calificadas como MEG. Pero para ser un buen indicador de la eficiencia, es decir, de obtener el mejor resultado posible con los medios de que se dispone, léase clasificar el mayor número posible de piezas de las aptas para uso estructural y no para otro uso de mayor valor, la muestra de partida tiene que ser representativa de esa población. Si el conjunto de piezas que se clasifica no ha sido sometido a ninguna selección previa de los fustes y/o de las piezas aserradas, dependiendo de la calidad de los árboles se obtendrá un rendimiento diferente, que no dependerá tanto de la eficiencia de la clasificación como de la calidad de la madera, rendimiento bajo si la madera es de baja calidad e incluye piezas poco aptas para uso estructural y alto si incluye piezas de carpintería o ebanistería. Posteriormente se analizará la eficacia, es decir, si la clase resistente obtenida con la clasificación es adecuada en términos estructurales y comerciales, que es muy diferente de eficiencia pero complementaria.

Los resultados de rendimiento, que es la variable medida, son bastante diferentes en los tres Grupos de probetas, por lo que se van a tratar de forma independiente. Y son diferentes porque la selección de las piezas antes de clasificar es diferente en cada uno de los casos, y por tanto es diferente la representatividad de la muestra de la población madera estructural como uso más valioso y la relevancia del rendimiento como medida de eficiencia. Estas diferencias permiten mostrar la importancia de la selección y del concepto de eficiencia.

En el Grupo A, la selección se ha realizado exclusivamente en las trozas antes de ser aserradas, fabricando probetas sólo de aquellas trozas que el personal del aserradero ha seleccionado par fabricación de elementos estructurales; no hay selección ni durante el aserrado ni posterior al aserrado, ya que las probetas ya están definidas en la troza, está especificada la probeta que debe obtenerse de cada troza.

En el grupo B no se ha llevado a cabo ninguna selección ni antes, ni durante ni después del aserrado, por lo que la calidad de las piezas depende en gran medida de la calidad de la madera en origen.

En el grupo C se produjo una primera clasificación de las trozas, que se completó con selección durante el aserrado, de modo que sólo llegaron a clasificación las piezas que el aserradero tradicionalmente destina a piezas estructurales, que puede suponer una selección excesiva.

Es importante resaltar que en los tres Grupos que incluyen cuatro aserraderos, tanto los criterios establecidos como sus límites han sido testados con éxito por personal de las empresas.

6.1.1 Grupo A

La muestra, procedente del valle del Garona, se obtuvo de árboles a ambos lados de la frontera y esta dividido en cuatro subgrupos, tal como aparece en el Capítulo 5.

La muestra se tomó de entre la madera seleccionada en monte por el aserradero para uso estructural. Por tanto la selección se hizo de madera en rollo, incluyendo en la población susceptible de ser muestreada sólo las trozas aptas para el aserrado de piezas estructurales, a criterio del aserradero. De esta manera ya hay bastante seguridad de que se muestrea madera de la calidad adecuada y de que el rendimiento calculado es indicativo para evaluar la eficiencia.

El rendimiento obtenido con este modo de muestreo es de alguna manera el más representativo de la eficiencia, pues la selección principal en los aserraderos se realiza por trozas e interesa que una vez seleccionada la mayor parte de la madera de la troza se pueda usar para madera estructural, aparte de la porción más exterior que se puede destinar a destinos más valiosos. En cambio si aparecen muchas piezas rechazadas por la clasificación en las trozas seleccionadas baja mucho valor medio y la rentabilidad, más aún si el rechazo se produce después del aserrado. Sin embargo, si durante el aserrado el operario de la sierra detecta baja calidad en una parte de la troza y modifica los criterios de corte para ir a dimensiones adecuadas para otros usos como embalaje, encofrado, etc., la pérdida es baja, por lo que en la evaluación de la eficiencia, este método penaliza sobre la eficiencia real.

En las muestras de este grupo el rendimiento es del 84 %, un valor bastante alto teniendo en cuenta las consideraciones de los puntos anteriores, con un mínimo de 71 % y un máximo de 93 %. Es de hecho similar al rendimiento en

otras especies en piezas de gran escuadría con los criterios de clasificación MEG, como por ejemplo el 89 % para pino silvestre, el 85 % para pino laricio, y el 83 % para pino radiata (Iñiguez 2007), y sensiblemente superior a la del pino radiata de origen Cataluña, un 53 %, aunque si se elimina como criterio de clasificación el alabeo se puede llegar al 83 % (Montón 2012). Se trata por tanto de un rendimiento en línea con el de otras clasificaciones.

En la Tabla 6.1 se refleja la influencia de los principales defectos en el rechazo de piezas. Se puede observar que incluso sin aparecer todos los criterios la suma es mayor del 100 %, ya que algunas piezas son rechazadas por varios motivos.

Tabla 6.1 Causa de rechazo de piezas en Grupo A

nudo cara	nudo canto	entrecasco	gema longitud	gema espesor	otros
7%	66%	17%	14%	7%	3%

Nota: El resto de defectos incluidos en *otros* tiene una escasa influencia, todos ellos con un porcentaje de rechazos inferior al 1%

El criterio que produce mayor número de rechazo es el nudo de canto, que por otra parte tiene una elevada influencia en la resistencia. Puesto que el espesor de las piezas es el mínimo para ser considerado gran escuadría, es lógico que el nudo en el canto tenga gran presencia como clasificador. Si embargo un defecto que se debe al aserrado, las gemas, tiene una repercusión mayor de la deseable, en muchos casos de gemas de pequeño espesor, que aunque tiene una influencia pequeña o nula en la resistencia de la pieza la incapacita para el uso estructural, principalmente por razones constructivas.

6.1.2 Grupo B

Todas las probetas, aunque de dos orígenes diferentes, Valle de Arán y Pallars Sobirà, corresponden a la misma región de procedencia 2 y se incluyen en un único lote.

Las probetas del Grupo B se han obtenido directamente de trozas de madera de abeto sin seleccionar, y tampoco se ha seleccionado durante o después del aserrado, por lo que se ha clasificado madera sin clasificar en ningún punto.

El rendimiento de clasificación de acuerdo a los criterios MEG expresados en la Tabla 7.1 es de un 54 %, muy inferior al caso anterior. Este rendimiento, si correspondiera a un lote de madera ya seleccionada para uso estructural, sería poco adecuado, con una eficiencia muy baja, que indicaría unos criterios de clasificación por tanto inadecuados para la especie, al menos en esa procedencia. Sin embargo, como en este caso el muestreo se ha realizado clasificando piezas que no han sido sometidas a ningún criterio previo, y por tanto incluye piezas de baja calidad que se hubieran aserrado en otras dimensiones y destinado a embalaje o encofrado, el rendimiento se

puede considerar satisfactorio, al iniciar que más de la mitad de la madera tiene un uso estructural.

En este sentido, el rendimiento obtenido no permite informar sobre la eficiencia de la clasificación, ya que en el rendimiento tiene más influencia la calidad de la madera en origen que la clasificación. Incluso con fustes de elevada calidad la clasificación sin selección conduce a un rendimiento bajo.

En este Grupo, tal como se comentó en el Capítulo 5, se realizó la clasificación sin mayor toma de datos. No se dispone de datos de la influencia de cada defecto en el rechazo.

6.1.3 Grupo C

En este caso las probetas de dos localidades, Irati y Roncal, y agrupadas en tres lotes de tres secciones diferentes, proceden de dos aserraderos en los cuales la elección de la muestra se ha realizado, en ambas empresas, de entre la madera ya aserrada para uso estructural y de las secciones habituales. Por lo tanto, al igual que en el caso de las piezas ensayadas en la UdL, se ha producido una selección de las trozas aptas para el uso estructural, que son las únicas que se han aserrado con dimensiones indicadas para este uso. Pero en este caso se ha producido una nueva selección para definir la población, ya que durante el aserrado se separan las piezas no adecuadas o se sierran directamente en otras dimensiones para otros usos. Es decir, se aplica una clasificación cualitativa siguiendo criterios tradicionales durante el aserrado. De esta manera el rendimiento proporcionado por la clasificación es superior y sobrestima la eficiencia, ya que se rechazan preventivamente piezas que serían aptas para uso estructural.

El rendimiento medio en los tres lotes es del 94 %, con un mínimo de 90 % y un máximo de 96 %. Se trata de un rendimiento muy elevado que pone de manifiesto lo adecuado de los criterios tradicionales, que incluso se podrían calificar como ligeramente conservadores. Como se ve en la Tabla 6.2, el único defecto que tiene un peso mucho mayor que el resto es la desviación de la fibra, en casi todas las piezas rechazadas, 9 de 11, hay una desviación excesiva.

Tabla 6.2 Causa de rechazo de piezas en Grupo C

desviación fibra	nudo cara	nudo canto	entrecasco	gema longitud	otros
82%	3%	16%	9%	7%	4%

6.2 Eficacia de la clasificación

La eficacia de la clasificación recoge un doble aspecto: la obtención de al menos una clase resistente útil en términos estructurales y comerciales, es decir que pueda competir con otras especies y materiales, y una efectiva discriminación, es decir que las propiedades de la población clasificada sean sensiblemente superiores a las de la no clasificada (rechazos). Esta segunda componente de la eficacia es relativa, pero la primera se puede objetivar estableciendo una clase resistente que como mínimo sea C18. En este

apartado vamos a calcular los valores característicos de los lotes para evaluar la eficacia de la clasificación.

Hay que tener en cuenta que en este apartado, parte de las probetas clasificadas han presentado alguna incidencia en el ensayo, por ejemplo duración superior a lo establecido en UNE-EN 408 o rotura por un defecto situado fuera de la zona cargada (tercio central). Por tanto el número de probetas utilizadas para calcular la eficacia es en algunos casos inferior al número de probetas pertenecientes a la clase MEG.

Los resultados de los ensayos han sido corregidos tal como se explica en el Capítulo 5, de modo los valores que se ofrecen ya incorporan dichas correcciones y pueden ser utilizados para la obtención de los valores característicos del lote, objeto de este apartado 6.2, y la posterior asignación de clase resistente de acuerdo a UNE-EN 338 en el apartado 6.3.

Para el cálculo de los valores característicos de cada lote, percentil 5 de la resistencia a la flexión MOR y de la densidad, y valor medio del módulo de elasticidad MOE se ha seguido la norma UNE-EN 384. El MOE característico es el valor medio del MOE ya corregido de todas las probetas del lote. Para obtener el percentil 5 de MOR se ordenan los valores de todas las probetas del lote ya corregidos, en orden ascendente, y el valor del 5º percentil corresponde al valor de MOR de la probeta que ocupa la posición 5% de esta lista, es decir, que el 95 % de los valores son iguales o superiores a este valor. Por ejemplo si el lote contiene 40 piezas, el percentil 5 es el valor de MOR de la pieza 2, la segunda pieza que menos resiste. En el caso de que el 5% del número de probetas no sea un número entero se interpola linealmente entre los dos valores adyacentes. Para obtener el valor característico de densidad del lote, que también es el percentil 5, se actúa de la misma forma.

6.2.1 Resultados ensayos Grupo A

En este punto se van a considerar en primer lugar todas las probetas pertenecientes a un único lote, ya que tienen la misma sección y puesto que consideradas por separado ninguna procedencia alcanza el tamaño mínimo de 40 piezas que se exige a una muestra. De este modo la procedencia se toma en un sentido amplio, no local sino regional. Con este enfoque, el número total de probetas válidas en el ensayo y clasificadas de acuerdo a las especificaciones de la calidad MEG es de 132.

Los valores de las variables caracterizadoras para las 132 probetas clasificadas y con ensayo válido se recogen en la Tabla 6.3. Como en todos los Grupos, los valores de densidad y módulo de elasticidad MOE están corregidos de acuerdo con el contenido de humedad de cada probeta y el valor de resistencia a la flexión MOR esta corregido a un canto de 142 mm, todo ello según UNE EN 384.

Nota: El módulo de elasticidad y la tensión de rotura se han nombrado con sus siglas en inglés MOE (*Modulus of Elasticity*) y MOR (*Modulus of Rupture*) respectivamente. Esta denominación es la más extendida en España, por lo que se ha usado también en este texto para facilitar su lectura. Tiene la ventaja de que también admite su interpretación como siglas en español: MOE como MÓdulo de Elasticidad y MOR como MÓdulo de Rotura.

Tabla 6.3 Resultados de los ensayos del Grupo A

MOR	MOE	Densidad	
percentil 5	medio	percentil 5	medio
N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³
21,27	14.359,17	385,77	442,35

Con las probetas de este Grupo, que constituyen un grupo numeroso con cuatro subgrupos, de A.1 a A.4, de diferentes procedencias, se han realizado dos análisis más. Por una parte se han procesado los resultados manteniendo la identidad de los subgrupos, es decir, considerando cada subgrupo como un lote, para obtener los valores de las variables clasificatorias que aparecen en la Tabla 6.4, junto al valor del módulo de rotura medio, MOR medio, que puede servir para ayudar a interpretar los resultados.

Tabla 6.4. Resultados de los ensayos de los subgrupos del Grupo A considerados como lotes

Lote	N	MOR		MOE	Densidad	
		percentil 5	medio	medio	percentil 5	medio
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³
1	34	19,74	37,21	10817,89	368,03	426,74
2	32	17,60	49,61	17113,51	407,73	465,50
3	33	22,46	40,74	17008,54	390,86	454,34
4	33	20,36	41,09	12968,12	389,37	423,98

Puesto que los subgrupos A.1 a A.4 no alcanzan el tamaño mínimo de 40 piezas se han elaborado subgrupos ficticios, agrupando de forma aleatoria todas las probetas en lotes de al menos 40 piezas. Puesto que el número total es 132, se han obtenido tres lotes de 44 piezas cada uno, que se han nombrado de A.A a A.C para evitar confusiones. Se han obtenido los valores de las mismas variables, cuyos resultados aparecen en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 Resultados de los ensayos de los subgrupos ficticios del Grupo A considerados como lotes

Lote	N	MOR		MOE	Densidad	
		percentil 5	medio	medio	percentil 5	medio
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³
A	44	15,37	39,96	13309,01	391,63	444,34
B	44	23,16	43,53	15657,37	385,80	447,89
C	44	19,66	42,71	14321,58	379,23	434,81

6.2.2 Resultados ensayos Grupo B

Las probetas se analizan también como un único lote por las mismas razones que en el apartado anterior. De igual modo se realizan las normativas correcciones por humedad y canto en flexión, con los resultados recogidos en la Tabla 6.6. El número de probetas válidas ensayadas es 81. Los valores de MOE y densidad han sido corregidos de acuerdo al contenido de humedad de cada probeta, y el de MOR de acuerdo al canto.

Tabla 6.6. Resultados de los ensayos del Grupo B

MOR	MOE	Densidad	
percentil 5	medio	percentil 5	medio
N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³
26,96	9.685,56	401,02	449,46

6.2.3 Resultados ensayos Grupo C

Las probetas de este Grupo, todas ellas de procedencia Navarra (región de procedencia 1), se distribuyen en tres lotes definidos por las diferentes secciones. A cada lote se le han realizado las correcciones marcadas por UNE EN 384, y los resultados se recogen en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. . Resultados de los ensayos del Grupo C

Lote	Sección	Nº probetas	MOR	MOE	Densidad	
			percentil 5	medio	percentil 5	medio
	cmxcm		N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³
C.1	15x7	47	24,20	13.680,78	381,27	438,12
C.2	16x12	47	18,51	11.573,46	393,59	434,44
C.3	25x20	44	20,52	12.300,38	415,51	425,01

6.2.4 Rechazos

No se dispone de los datos de las piezas no clasificadas (rechazos) del Grupo B. Se han procesado los datos de las probetas rechazadas de los Grupos A y C por separado. Sin embargo, teniendo en cuenta algunos factores

1. el número de probetas rechazadas en cada una de ellas es muy bajo;
2. el cálculo del percentil 5 tiene poco sentido;
3. los valores medios se han construido con una muestra muy pequeña.

Se ha decidido agrupar en la Tabla 6.8, a efectos puramente informativos, los dos grupos para intentar obtener una mayor representatividad.

Tabla 6.8. Resultados de los ensayos de los rechazos

Grupo	Nº rechazos	MOR	MOE	Densidad	
		percentil 5	medio	percentil 5	medio
		N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³
A	10	13,11	12.044,40	367,67	427,11
B	9	11,44	10.080,70	370,86	464,86
TOTAL	19	11,44	11.114,23	367,67	444,99

6.2.5 Influencia del tamaño de la sección

El abeto blanco de España es una especie de la que no se conoce cuál es la influencia del tamaño de la sección, y particularmente del canto en flexión, en la resistencia a flexión, y por tanto la desviación que se puede producir tanto en el cálculo del valor característico del MOR como en la aplicación del Código Técnico de la Edificación. Por ello se va a intentar obtener un valor del parámetro del efecto el tamaño de la sección α definido como la pendiente de la recta definida por la variación del logaritmo de las

resistencias f_i al variar el tamaño de la pieza (definido por su longitud, altura de la sección o volumen) S_i :

$$\alpha = (\log f_1 - \log f_2) / (\log S_2 - \log S_1) \quad (6.1)$$

Este parámetro permite establecer la relación k entre las resistencias de dos tamaños diferentes:

$$k = f_1/f_2 = (S_2 / S_1)^\alpha \quad (6.2)$$

Así se puede obtener la resistencia de una sección a partir de la resistencia de una sección de referencia. En particular se puede usar con la altura de la sección (canto en flexión) tal como hace UNE-EN 384 con un canto de referencia de 150 mm y con un valor de α igual a 0,2:

$$k = (150/h)^{0,2} \quad (6.3)$$

por lo que la resistencia se puede obtener con una ecuación del tipo:

$$f_k = A \cdot (150/h)^B \quad (6.4)$$

En este apartado se va a intentar evaluar si el valor citado de 0,2 es adecuado para el abeto blanco, y se va a realizar un ajuste con la ecuación (6.4) para obtener los valores de A y B . El número de datos disponibles en el presente trabajo no es suficiente para obtener un resultado definitivo para la especie, pero sí para un primer resultado.

Es necesario decir en este punto que habitualmente cuando se realizan ajustes para cuantificar el efecto del tamaño de la sección se usan valores característicos. Sin embargo el ajuste se emplea corrigiendo todos los valores de los ensayos, por lo que quizás puede ser más correcto ajustar valores medios, ya que en el valor característico de cada lote influyen más factores que en el valor medio, menos sesgado.

También indicar que en algunos trabajos (Fernández Golfín 2002, Arriaga 2007) se realiza un ajuste para altura h y anchura b de la sección de tipo

$$f_k = A \cdot (150/h)^B \cdot (50/b)^C \quad (6.5)$$

En el presente trabajo únicamente se va a considerar ecuaciones que utilizan el canto en sección del tipo (6.4) ya que son las que actualmente pueden tener una aplicación práctica en la normativa y el cálculo.

Influencia del tamaño de la sección en Grupo C

Se ha hecho una primera aproximación usando exclusivamente las probetas del Grupo C, ya que se dispone de tres lotes con tres secciones bastante diferentes. Puesto que son probetas del mismo origen y con la misma clasificación debería ser más preciso el ajuste del tamaño de la sección al reducirse el ruido estadístico y por tanto amplificarse el efecto de la sección. Puesto que se dispone además de un lote con canto 150 mm, el C.1, se puede tomar éste como referencia y calcular cuál es el valor del exponente necesario para obtener el valor de resistencia de los otros dos lotes. Se han usado los valores de MOR medio de cada lote, y se ha obtenido el valor de α en la Ecuación (6.6)

$$MOR_{150}/MOR_h = (150/h)^\alpha \quad (6.6)$$

MOR_{150} es el valor medio del MOR del lote canto 150 mm

MOR_h es el valor medio del MOR del lote canto h mm

El resultado es que para un canto de 160 mm el valor de α es de 3,41 y para el lote de canto 250 el valor es de 0,44. Ambos valores son mucho mayores que el valor de 0,20 habitual, y parecen demasiado grandes. Si aplicamos el mismo procedimiento a los valores característicos los valores de α que obtenemos son de 4,15 y 0,32 también muy altos. La explicación puede ser que haya otros factores, como la calidad de la madera no homogéneamente distribuida entre los lotes.

Para contrastarlo se ha realizado el análisis para los valores individuales en lugar de para los valores medios o característicos. Así se han elaborado dos relaciones de pares de valores ordenados de MOR, una con los valores de canto 150mm y canto 160mm, y otra con los valores de resistencia de canto 150mm y canto 250mm. Es decir, en cada lote se han ordenado en orden ascendente los valores de MOR, y para cada par de valores MOR_{150} y MOR_h , se ha calculado el α correspondiente de acuerdo a la Ecuación (6.6). El resultado son dos relaciones de valores de α , para cada una de las cuales se ha calculado el valor medio. Además con los pares de valores se ha realizado un ajuste entre MOR y α para cada uno de los pares de valores (MOR_i, α_i) en cada sección. Se ha optado por una regresión lineal, aunque el ajuste no es el mejor, por su carácter indicativo.

El valor medio de α para la sección de 160 mm de canto es 3,74 todavía mayor. La recta de regresión, Ecuación (6.7) que se incluye junto con su R^2 , refleja un buen ajuste y una tendencia claramente decreciente, con valores de α de alrededor de 1,6 para los valores de resistencia mayores. Es decir que cuando la resistencia es baja la influencia de la altura de la sección es mayor.

$$\alpha = -0,1295 MOR_{160} + 8,6657 \quad R^2 = 0,8798 \quad (6.7)$$

Para el lote con canto 250 mm el valor de α es de 0,56, algo menor, y la regresión, Ecuación (6.8) con un ajuste mucho peor, muestra también una tendencia decreciente pero mucho menos acusada, tal como se aprecia en la ecuación:

$$\alpha = -0,0046 MOR_{250} + 0,7072 \quad R^2 = 0,1581 \quad (6.8)$$

Si procesamos todos los datos juntos obtenemos un valor medio de α de 2,09 y la Ecuación (6.9), que proporciona valores para α mucho mayores de 0,2, aunque con baja correlación. Lo más interesante es que se confirma la relación inversa entre α y resistencia, es decir, la influencia del tamaño de la sección es menor cuanto mayor es la calidad. Esto resulta lógico ya que precisamente la influencia del tamaño sobre la resistencia reside, por una parte, en la mayor probabilidad, cuanto mayor es el tamaño, de encontrar un defecto que reduzca localmente la resistencia en las zonas de mayor tensión. En piezas con pocos defectos la probabilidad aumenta mucho menos que si el número de defectos es elevado. Por otra, a mayor tamaño mayor probabilidad de defectos no críticos que aumentan la tensión en zonas críticas, por ejemplo por desviación de la fibra neutra, probabilidad que crece con el número de defectos. En ambos casos el efecto del tamaño se acentúa

con la baja calidad, ya que más defectos contienen las piezas y más crece la probabilidad de fallo.

$$\alpha = -0,0123 \text{ MOR}_h + 2,5190 \quad R^2 = 0,0036 \quad (6.9)$$

Los valores siguen siendo elevados, y se pueden deber no sólo a la influencia de a sección sino también a una distribución no generalizable de resistencias en alguno o en todos los lotes. El valor de MOR del lote de canto 150 mm es comparativamente elevado, por lo que se puede suponer una mayor calidad de este lote que del resto.

Comparación Grupo A - Grupo C

Puesto que la calidad del lote C.1 parece superior a la del resto de lotes del Grupo C se ha tomado como referencia el Grupo A, cuyas probetas tiene un canto de 142 mm, próximo a 150, y cuya calidad, entendida como la distribución de resistencias, puede ser más representativa.

Por ello se ha realizado una comparación de los valores de resistencia medios (MOR medio) de los dos lotes de canto 160 y 250 mm tomando como referencia el MOR medio del lote de las 132 piezas ensayadas en la UdL.. En este caso se ha tomado como canto de referencia 142 mm, y se ha aplicado la misma técnica de obtener la relación entre el MOR medio de cada lote y el MOR medio de la sección de referencia y calcular el α en la expresión:

$$\text{MOR}_{142}/\text{MOR}_h = (142/h)^\alpha \quad (6.10)$$

MOR_{142} es el valor medio del MOR del lote canto 142 mm

MOR_h es el valor medio del MOR del lote canto h mm

El resultado es que para un canto de 160 mm el valor de α es de 0,03 y para el lote de canto 250 el valor de α es de 0,05. Si usamos valores característicos los resultados son 1,16 y 0,06 respectivamente.

Ajuste de ecuaciones

Se ha realizado varios ajustes de acuerdo a la Ecuación (6.4).

El primer ajuste utiliza los valores medios de MOR de cada subgrupo o lote de diferente sección y todos con más de 40 piezas, es decir de A, B, C.1, C.2, y C.3, con el mismo peso en el ajuste independientemente del número de probetas que contenga cada lote. El resultado es la Ecuación (6.11) que presenta un R^2 de 0,64.

$$f_k = 41,39 \cdot (150/h)^{0,37} \quad (6.11)$$

Puesto que los lotes A y B tiene un tamaño muy superior a los C.i, se ponderó el valor de su correspondiente MOR medio, por tres en el caso del Grupo A y por dos en el caso del grupo B, con resultado la Ecuación (6.12) que presenta un R^2 de 0,70, mayor que en el caso anterior, con unos valores de los parámetros bastante similares.

$$f_k = 41,58 \cdot (150/h)^{0,39} \quad (6.12)$$

Repitiendo el proceso para los valores característicos obtenemos las ecuaciones (6.13), con un R^2 de 0,33 y (6.14) con un R^2 de 0,39 para peso simple y ponderado de cada lote respectivamente. Un ajuste bastante peor

que para el caso de los valores medios, pero bastante consistentes en cuanto al valor del exponente que es el principal resultado buscado.

$$f_k = 22,54 \cdot (150/h)^{0,31} \quad (6.13)$$

$$f_k = 22,47 \cdot (150/h)^{0,37} \quad (6.14)$$

6.3 Asignación de clase resistente

6.3.1 Reglas de asignación

La asignación de clase resistente para una población, en este caso especie *Abies alba* y procedencia España, se realiza de acuerdo a la UNE-EN 338. Para ello es necesario obtener los valores característicos de resistencia a flexión MOR (percentil 5), módulo de elasticidad MOE (valor medio) y densidad (percentil 5) de la población, que se estiman a partir de los valores de los lotes siguiendo las reglas establecidas para cada una de las variables clasificatorias en UNE-EN 384.

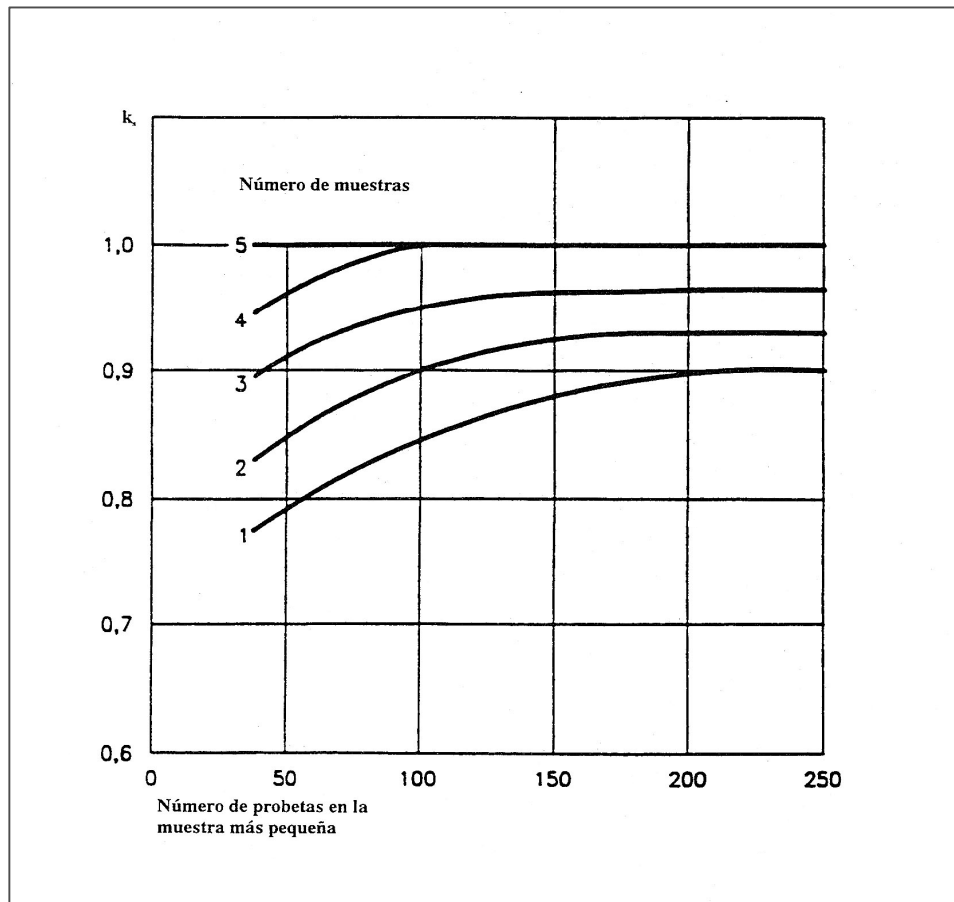
Para el cálculo del valor característico de resistencia a flexión f_k de la población se usa la expresión contenida en la Ecuación (6.15).

$$f_k = f_{k,med} k_s k_v \quad (6.15)$$

Dónde $f_{k,med}$ es el menor de los dos valores siguientes:

1. La media de los valores característicos de los lotes, ponderada por el número de probetas que contienen;
2. El valor de resistencia característica del lote con menor resistencia característica MOR_{min} multiplicado por 1,2.

Este valor tiene que ser corregido de acuerdo a la Ecuación (6.15) por el factor k_s que depende del número de lotes y del tamaño de los mismos, en particular del tamaño del lote con menor número de piezas ensayadas, tal como se establece en el Gráfico 6.1. El factor k_v depende del sistema de clasificación empleado, y el sentido es recoger en la evaluación la menor variabilidad de la clasificación mecánica respecto a la visual. A una clasificación visual, como la que se ha realizado en esta tesis, corresponde el valor de 1, por lo que únicamente se aplicará el valor correspondiente de k_s .

Figura 6.1 Coeficiente k_s en UNE-EN 384

En lo concerniente al valor característico del módulo de elasticidad de la población E_{medio} se obtiene calculando la media del valor de los lotes, ponderado por el tamaño de los mismos.

De igual manera el valor característico de la densidad para la población D_k se obtiene calculando la media de los valores característicos de densidad de los lotes.

6.3.2 Población española

El Grupo A formado por cuatro subgrupos, incluye probetas de origen Francia, por lo que no puede ser utilizado para la asignación de clase resistente de la población española. Podría usarse el subgrupo A.1, que procede de la parte española del valle del Garona, pero su tamaño es inferior a 40 piezas por lo que no es apto, ya que UNE-EN 384 exige ese tamaño mínimo. Por lo tanto se usarán los Grupos B y C. El Grupo C está compuesto a su vez por tres subgrupos, C.1, C.2 y C.3, cada uno con más de 40 piezas y de una sección diferente, por lo que se consideran lotes independientes.

Para el cálculo del valor característico de la resistencia a flexión aplicamos la Ecuación (6.15). El número de lotes es de 4 y el tamaño mínimo de lote es de 44 piezas, por lo que de acuerdo a la Figura 6.1 el valor de k_s es 0,95 que se multiplicará por $f_{k,med}$. Para el cálculo de éste valor hay considerar que el lote

que presenta el menor valor de resistencia a la flexión, MOR_{min} , es el subgrupo C.2.

Aplicando las reglas explicadas en el apartado 6.3.1 obtenemos los valores característicos de resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y densidad, tal y como se refleja en la tabla 6.9.

Tabla 6.9 Valores característicos de la población española

Grupo	Lote	Nº probetas	MOR	MOE	Densidad
			percentil 5 N/mm ²	medio N/mm ²	percentil 5 kg/m ³
B	B	81	26,96	9.685,96	401,02
C	C.1	47	24,20	13.680,78	381,27
C	C.2	47	18,51	11.573,46	393,59
C	C.3	44	20,52	12.300,38	415,51
Media		219	23,26	11.473,65	398,10
MORmin	C.2	47	18,51		
1,2 x MORmin			22,21		
<i>fk,med</i>			22,21		
ks			0,95		
Característico		219	21,10	11.473,65	398,10

Los valores característicos los comparamos con los valores límite establecidos por UNE EN 338 para las diferentes clases resistentes recopilados en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10 Valores característicos de las clases resistentes UNE-EN 338

	MOR N/mm ²	MOE N/mm ²	Densidad kg/m ³
C18	18	9.000	320
C20	20	9.500	330
C22	22	10.000	340
C24	24	11.000	350
C27	27	11.500	370
C30	30	12.000	380
C35	35	13.000	400
C40	40	14.000	420

Comparando los datos de las dos tablas podemos hacer la asignación de clase resistente para la madera de abeto blanco española. El valor limitante es el de la resistencia a flexión MOR y la asignación es **C20**. De acuerdo al valor característico de MOE la clasificación sería C30, ya que UNE-EN 338 admite un valor de MOE del 95 % del que marca la clase resistente, en este caso el límite de asignación es $0,95 \times 12.000 \text{ N/mm}^2$, es decir 11.400 N/

mm². De acuerdo a la densidad se alcanzaría también la clase resistente C30.

6.3.3 Población Pirineos

Puesto que existe una población de abeto blanco bien definida, la que se distribuye por las dos vertientes, española y francesa, de los Pirineos, y disponemos de probetas de origen francés, vamos a obtener la clase resistente que corresponde a esta población.

La muestra queda conformada con los lotes correspondientes a la población española, B, C.1, C.2 y C.3 que suman 219 probetas al que se añade uno nuevo, el Grupo A, con 132 probetas de las cuales 98 son francesas.

Aplicamos el mismo procedimiento descrito en 6.3.1. En este caso el número de lotes es de 5 y por tanto, de acuerdo al la Figura 6.1, el valor de k_s es 1. El lote de menor resistencia sigue siendo el C.2.

En la Tabla 6.11 se ofrecen los valores característicos de esta población así como los valores intermedios para su obtención.

Tabla 6.11. Valores característicos de la población Pirineos

Grupo	Lote	Nº probetas	MOR	MOE	Densidad
			percentil 5 N/mm2	medio N/mm2	percentil 5 kg/m3
A	A	132	21,27	14.359,17	385,77
B	B	81	26,96	9.685,96	401,02
C	C.1	47	24,20	13.680,78	381,27
C	C.2	47	18,51	11.573,46	393,59
C	C.3	44	20,52	12.300,38	415,51
Media		351	22,51	12.558,80	393,46
MORmin	C.2	47	18,51		
1,2 x MORmin			22,21		
<i>fk,med</i>			22,21		
ks			1		
Característico		351	22,21	12.558,80	393,46

Comparando los datos de la Tabla 6.11 con los de la Tabla 6.10 obtenemos la clase resistente de la población Pirineos, que corresponde a una **C22**. En este caso, igual que en la población española, la variable clasificatoria es el valor del percentil 5 del MOR. Si la clasificación se realizara por módulo de elasticidad, y teniendo en cuenta lo apuntado en 6.3.2, correspondería a una C35, y por densidad a una C30.

La madera de abeto española puede considerarse incluida en su totalidad en esta población. En las regiones de procedencia A y B, prepirenaicas parece claro, por su integración geográfica, pero también la C, Montseny, ya que las tres suponen un porcentaje tan pequeño de la población y mucho más todavía de la madera de abeto comercializada, que difícilmente podría justificarse obtener un lote de alguna de las localizaciones, que además

estarían sobrerrepresentadas, e incluso es dudoso que fuera autorizada la corta.

Los resultados que se ofrecen en el siguiente apartado ofrecen más luz sobre la oportunidad de establecer la población Pirineos y su aplicación a la madera española.

6.3.4 Comparación población española vs población Pirineos

En este apartado vamos a estudiar si la inclusión del Grupo A para clasificar la madera supone algún riesgo de inseguridad para la madera española o si bien el Grupo A ofrece un aumento de seguridad estadística fundamentado en un mejor conocimiento de la población de forma justificada. Puesto que la asignación de clase resistente se debe exclusivamente a la resistencia a la flexión MOR se va a analizar solamente esta variable.

Es interesante observar que la inclusión del Grupo A en la población española reduce el valor de la media de esta población, ya que el percentil 5 del Grupo A es inferior a la media, por lo que se puede afirmar que la inclusión de este nuevo lote no sobrevalora el valor de MOR. Más todavía cuando el valor característico viene definido por el lote C.2 el de menor resistencia de la población española. Por tanto la inclusión del Grupo A, desde este punto de vista, no supone riesgo de sobrestimación de los valores de la población española.

Profundizando un poco más se aprecia que la inclusión del Grupo A homogeneiza la muestra. El coeficiente de variación (CV) de la muestra una vez incluido el grupo A, población Pirineos, es 14,72 % frente al 16,20 % de la población española. Una medida de la compacidad de la muestra puede ser la distancia del valor mínimo al valor medio. En el caso de la población Pirineos la diferencia entre el valor medio y el mínimo es de 4,00 N/mm² (17,8%) frente a 4,75 N/mm² (20,4%) para la población española. Obviamente lo mismo sucede si vemos la distancia entre el valor que supone la clasificación de la población, la resistencia característica del lote/subgrupo C.2 multiplicado por 1,2, que es mucho más próximo al valor medio de la población Pirineos, hay una diferencia entre ambos de sólo 0,30 N/mm² frente a 1,05 N/mm² para el caso de la población exclusivamente española, lo cual da idea de una población mejor representada.

La inclusión del Grupo A aparte de una mayor representación proporciona pues mayor consistencia a la muestra; la mejora del valor característico, que se produce exclusivamente por el incremento de la muestra y no por aumento de los valores de resistencia, parece plenamente justificada.

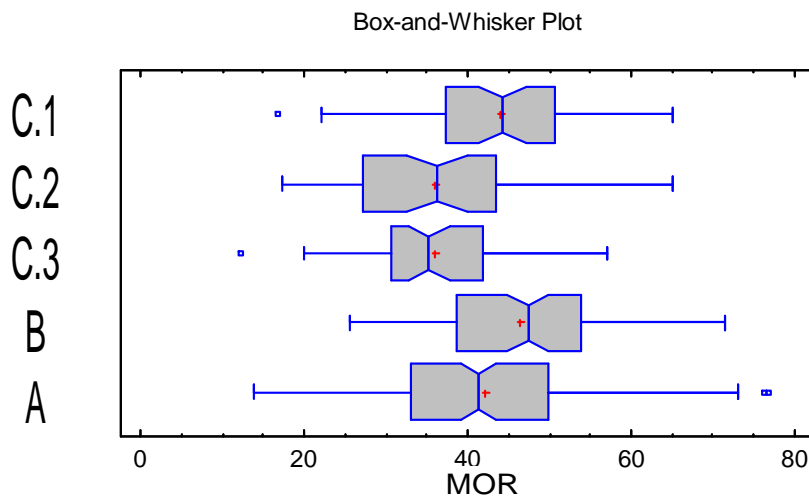
Este concepto se ve corroborado con algunos análisis estadísticos realizados a los cinco lotes que conforman la muestra de la población Pirineos, siempre referidos a los valores de resistencia a flexión MOR. En la Tabla 6.12 se ofrecen los valores para las principales variables descriptivas de los lotes, en los que se aprecia que el Grupo A (lote A) se integra bien en la muestra con valores similares de las variables. Es interesante observar que el Grupo A presenta un rango que es prácticamente el del resto de la muestra unida. Los valores de Kurtosis y Skewness sitúan a los lotes dentro de la normalidad.

Tabla 6.12 Principales descriptivos estadísticos de los lotes Pirineos

	C.1	C.2	C.3	B	A
Nº de piezas	47	47	44	81	132
Media	44,06	36,00	36,12	46,31	42,07
Desviación típica	10,22	11,05	8,63	10,79	13,16
Coefficiente de variación	23,19%	30,70%	23,89%	23,30%	31,27%
Mínimo	16,81	17,29	12,30	25,58	13,79
Máximo	65,13	64,98	57,07	71,50	76,90
Rango	48,31	47,69	44,77	45,92	63,11
Skewness estándar	-0,99	1,17	-0,70	-0,16	1,76
Kurtosis estándar	0,32	-0,33	0,79	-1,11	-0,07

En la Figura 6.2, gráfico de caja y bigotes que incluye el intervalo de confianza tanto para la media como para la mediana, se muestran los resultados para los cinco lotes, en el que se aprecia que el Grupo A ocupa un lugar centrado en el conjunto de la muestra. Esta situación centrada no sólo se aprecia en el mencionado dato del rango, sino también porque tanto el intervalo de confianza para la media como para la mediana del Grupo A están incluidos en el intervalo definido por el resto de lotes.

Figura 6.2. Diagrama de caja y bigotes para los lotes de la muestra Pirineos



Se vislumbra de este modo lo acertado de la UNE-EN 384 al establecer en cinco el número de lotes necesario para no penalizar el valor característico de la resistencia. En este caso el efecto positivo de alcanzar los cinco lotes es especialmente destacable.

En el resultado del Método de Scheffe reflejado en la Tabla 6.13 se aprecia que el lote A forma un grupo homogéneo por una parte con C.3, y por otra con C.1 y B. La imagen de compacidad se completa ya que C.1 y C.2 forman a su vez un grupo homogéneo. Así todos los lotes están relacionados en escala, formando una muestra compacta.

Tabla 6.13. Test de Rango Múltiple para identificación de grupos homogéneos

Lote/Grupo	Nº piezas	Media	Grupos homogéneos
C.2	47	36,00	X
C.3	44	36,13	XX
A	132	42,07	XX
C.1	47	44,06	X
B	81	46,31	X

6.4 Evaluación de lotes incompletos

La composición del Grupo A con cuatro subgrupos de diferentes procedencias dentro de la misma región de procedencia y con la misma sección todos ellos menores de 40 piezas nos permite estudiar, con la variabilidad limitada, la posibilidad de uso de lotes incompletos para la asignación de clase resistente de una población y sus consecuencias

Se va a seguir, para la población Pirineos, el mismo proceso descrito en 6.3.1, que se ha usado con lotes completos. En este caso se usarán como lotes los subgrupos del Grupo A, lotes A.1, A.2, A.3 y A.4, además del lote/Grupo B y los lotes del Grupo C, de C.1 a C.3. Es decir 8 lotes en total, la mitad, todos del Grupo A, incompletos en cuanto que no alcanzan las 40 piezas.

Se ofrecen los resultados de la asignación de clase resistente en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14 Valores característicos de la población Pirineos con lotes incompletos

Grupo	Lote	Nº probetas	MOR	MOE	Densidad
			percentil 5 N/mm ²	medio N/mm ²	percentil 5 kg/m ³
A	A.1	34	19,74	10.817,89	368,03
A	A.2	32	17,60	17.113,51	407,73
A	A.3	33	22,46	17.008,54	390,86
A	A.4	33	20,36	12.968,12	389,37
B	B	81	26,96	9.685,96	401,02
C	C.1	47	24,20	13.680,78	381,27
C	C.2	47	18,51	11.573,46	393,59
C	C.3	44	20,52	12.300,38	415,51
Media		351	22,11	12.622,13	395,67
MORmin	A.2	32	17,60		
1,2 x MORmin			21,12		
$f_{k,med}$			21,12		
ks			1		
Característico		351	21,12	12.622,13	395,67

Los resultados muestran que los lotes con un número de probetas próximo pero inferior a 40 perjudican el valor característico de resistencia MOR de la población. Las muestras tienen un número de probetas suficiente para recoger bastante bien la variabilidad de la población, y por tanto contienen con elevada probabilidad probetas con valores bajos de resistencia. Sin embargo, al ser menor de 40 el número de probetas, la posición que ocupa el 5% es inferior a 2, y por tanto la resistencia característica del lote está fuertemente ligada a la probeta menos resistente de cada lote, tal como se deduce del modo de cálculo del valor característico de un lote explicado en el apartado 6.2. La conjunción de ambas circunstancias supone que el valor característico se vea penalizado, más todavía si el valor de $f_{k,med}$ de la Ecuación (6.15) corresponde no al valor medio de los lotes sino al valor característico del lote de menor resistencia multiplicado por 1,2.

En este caso esa es precisamente la situación. El lote con menor valor de resistencia característica es el A.2, que a la vez es el lote con menor número de probetas, 32. El 5 % de 32 es 1,6, es decir que el valor característico del lote es el valor de la probeta menos resistente más el 60 % de la diferencia entre las dos probetas menos resistentes del lote. El valor de $f_{k,med}$ corresponde al valor de MOR de A.2 multiplicado por 1,2, ya que es menor que el valor de MOR medio del lote. Por tanto el valor característico de la población está definido por el lote de menor resistencia, el A.2, en el que tiene gran influencia la probeta menos resistente del lote que a su vez es la menos resistente de la muestra. De modo que el valor característico de la población está definido por la probeta menos resistente de todas las ensayadas, algo que va completamente en contra del modelo estadístico diseñado para obtener los valores característicos. Este es un caso extremo pero real, que se puede repetir habitualmente si se usan lotes de menos de 40 probetas.

Si analizamos brevemente la muestra vemos que es de nuevo menos compacta aunque más homogénea que en el caso de la población Pirineos, con un CV del 12,86 % debido a la mayor homogeneidad de los cuatro lotes A, y una distancia del valor mínimo a la media de 4,16 N/mm² (19%).

El valor característico del MOR es prácticamente el mismo que en el caso de la población española, pero ésta con cuatro lotes, y por tanto con penalización de 0,95 por el número de lotes menor de cinco. Es decir el añadido de cuatro lotes, que dobla el número de lotes de la muestra, no supone ninguna mejora del valor característico debido al bajo número de probetas de los lotes.

La asignación de clase resistente sería la misma que para la población española de cuatro lotes, C20, aunque ateniéndonos a las otras dos variables clasificatorias, MOE sería C35 y respecto a la densidad la clase sería una C30. Si consideramos como criterio de clasificación, es decir como $f_{k,med}$, la media ponderada de MOR la clase resistente sería C22, el mismo que la población Pirineos, lo cual recalca el sesgo desfavorable de tomar lotes de menos de 40 piezas.

6.5 Evaluación de lotes aleatorios

Existe otra posibilidad para el uso de lotes incompletos, y es su recombinación aleatoria en lotes de al menos 40 piezas. En este caso como el Grupo A tiene 132 piezas se decide hacer tres lotes aleatorios de 44 piezas cada uno, tal y como se explicaba en 6.2.1. Esta opción tiene el riesgo de agrupar las piezas de menor resistencia en un mismo lote que penalice mucho su valor característico. En este caso probablemente el valor característico del lote menos resistente multiplicado por 1,2 sea menor que la media y por tanto penalice el valor característico de la población.

Así sucede en este caso. El azar se muestra desfavorable para el valor característico de MOR, ya que ha agrupado en el mismo lote las probetas de menor resistencia. De esta manera el valor característico de este lote ficticio es muy bajo, tal como se aprecia en la Tabla 6.15 que muestra los valores característicos de la población Pirineos evaluada con estos lotes ficticios.

6.15 Valores característicos de la población Pirineos con lotes ficticios

Centro	Lote	Nº probetas	MOR	MOE	Densidad
			percentil 5	medio	percentil 5
			N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³
A	A.A	44	15,37	13309,01	391,63
A	A.B	44	23,16	15657,37	385,80
A	A.C	44	19,66	14321,58	379,23
B	1	81	26,96	9.685,96	401,02
C	1	47	24,20	13.680,78	381,27
C	2	47	18,51	11.573,46	393,59
C	3	44	20,52	12.300,38	415,51
Media			21,81	12.585,18	393,38
MORmin	A.A	44	15,37		
1,2 x MORmin			18,44		
<i>fk,med</i>			18,44		
ks			1		
Característico		351	18,44	12.585,18	393,38

La clase resistente que le corresponde es la C18. Si tuviéramos en cuenta sólo el módulo de elasticidad sería una C35 y de acuerdo a la densidad una C30. Es una clasificación mucho más baja que el resto de opciones, con una elevada penalización del valor característico de resistencia a flexión, que no de los valores de densidad ni módulo de elasticidad. Si se usara como valor característico de MOR el valor medio de los valores característicos de los lotes el efecto sería mucho menos acusado.

Evaluando brevemente homogeneidad y compacidad encontramos que la muestra es la más heterogénea con un coeficiente de variación CV del 17,77 %, en gran medida por la heterogeneidad de los tres grupos formados aleatoriamente que tiene un CV del 20 %. También la distancia del valor mínimo a la media es la mayor de todas las muestras, 6,44 N/mm², que supone un 29,5 %, en gran parte por la que hay dentro del grupo de lotes ficticios que es de 4,03 N/mm², el 21 %.

7 Conclusiones y propuestas

7.1 Clasificación visual

- La aplicación de los criterios de clasificación de la clase visual MEG establecidos en UNE 56544 junto con la limitación del nudo aislado a 8 cm produce una clasificación suficientemente satisfactoria.

- La eficiencia es elevada. La eficiencia real, estimada por un valor de rendimiento intermedio entre los del Grupo A y del Grupo C, se puede situar en el entorno del 90%.

- Se pone de manifiesto la necesidad de una selección de la madera en rollo para obtener un buen rendimiento en madera estructural. La selección complementaria durante el aserrado eleva el rendimiento hasta cerca del 100%. Los criterios de selección actualmente en uso son adecuados.

- La eficacia es alta, con valores característicos para cada lote que permiten obtener al menos una clase resistente C18, marcada como objetivo de eficacia, a la vez que los rechazos presentan unos valores mucho menores, que apuntan a una clase resistente C14.

- La clasificación con las especificaciones de la calidad MEG se ha aplicado con éxito en los aserraderos y es adecuada para una clasificación comercial.

- Se aceptan las especificaciones de la calidad MEG, con la inclusión de un criterio conservador de tamaño máximo de nudo aislado (no afecta a los nudos agrupados), como regla de clasificación para piezas de abeto blanco de grueso igual o superior a 70 mm. Estas especificaciones quedan recogidas en la Tabla 7.1.

- Se propone la inclusión del abeto en la norma UNE 56544 de acuerdo a los criterios establecidos en la Tabla 7.1, con la denominación MEG

Tabla 7.1 Criterios de clasificación MEG para el abeto blanco

CRITERIOS DE CALIDAD		MEG
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA (h)		$d \leq 2/3$ de "h" $d \leq 8$ cm
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO (b)		$d \leq 2/3$ de "b" $d \leq 8$ cm
ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO ⁽¹⁾		
- Pino silvestre		Sin limitación
- Pino laricio		Sin limitación
- Pino gallego y pinaster		Sin limitación
- Pino insigne (radiata)		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.
	- 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		
- longitud		$\leq 1/3$ de "L"
- dimensión relativa		$g \leq 1/3$
MÉDULA ⁽¹⁾		Admitida
ALTERACIONES BIOLÓGICAS		
- Muérdago (<i>V. album</i>)		- No se admite
- Azulado		- Se admite
- Pudrición		- No se admite
- Galerías de insectos xilófagos		- No se admiten
DEFORMACIONES MÁXIMAS ^{(2) (3) (4) (5)}		
- Curvatura de cara		20 (10) mm (para una longitud de 2 m)
- Curvatura de canto		12 (8) mm (para una longitud de 2 m)
- Alabeo		2 (1) mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m)
- Abarquillado		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>		

7.2 Influencia del tamaño de la sección

- La influencia del tamaño de la sección es mayor en los valores más bajos de resistencia, es decir, en las piezas de menor calidad.

- La obtención de valores para la corrección de la resistencia por la altura de la sección basados en la comparación de los valores reales de los lotes con los valores reales de los lotes de la sección de referencia da resultados dispersos, con valores del parámetro del efecto del tamaño α entre 0,32 y 4,15.

- El ajuste de la ecuación por regresión lineal de la influencia del tamaño de la sección da resultados coherentes e indican una influencia de la altura de la sección mucho mayor que en otras especies, aunque inferior al del pino laricio. Las diferencias en el cálculo de resistencia pueden llegar hasta el 8 % para valores de altura de la sección alejados de la de referencia de 150 mm.

- El ajuste realizado con valores medios ponderados de acuerdo al número de piezas de cada lote es

$$f_k = 41,58 \cdot (150/h)^{0,39} \quad R^2 = 0,70$$

- Y para los valores característicos ponderados

$$f_k = 22,47 \cdot (150/h)^{0,37} \quad R^2 = 0,39$$

- Puede ser conveniente ajustar el valor normativo a las especies y calidades, en particular para el abeto blanco, ya que existen diferencias que pueden ser importantes.

7.3 Asignación de clase resistente

- Se han muestreado las principales masas de abeto blanco tanto de España como de los Pirineos en ambas vertientes, España y Francia, por lo que los resultados obtenidos son representativos para esta especie en ambas procedencias.

- Se han muestreado cuatro aserraderos, que suman la mayor parte de la producción de la madera estructural de abeto blanco, y cinco secciones de grosor igual o mayor que 70 mm, que cubren ampliamente la oferta comercial de madera estructural de la especie. La sección máxima muestreada es 250 x 200 cm, representativa de las escuadrías muy grandes, y utilizada como sección máxima para varias especies (Íñiguez 2007).

- La clase resistente obtenida para la población española de madera de abeto blanco, con una muestra de cuatro lotes completos (al menos 40 piezas) es la C20.

- La clase resistente obtenida para la población Pirineos (que incluye a la española, ya que corresponde a la cordillera pirenaica completa, España y Francia) de madera de abeto blanco, con una muestra de cinco lotes completos (al menos 40 piezas) es la C22.

- La clase resistente C22, como clase única, es coherente con las clases resistentes de otros países europeos. Estos países tienen entre 2 y 4 clases visuales, con clases resistentes que van desde C14 a C30, con el centro entre C22 y C24. Se propone realizar al menos otra clase resistente de mayor valor ya que los indicios muestran que el comportamiento es similar al de otras procedencias.

- De las tres variables de clasificación que exige UNE-EN 338, los valores característicos de MOR, MOE y densidad, es el valor característico de MOR el más restrictivo en ambas poblaciones, y por tanto el que efectivamente define la clase resistente. Los valores característicos de MOE y densidad permitirían la asignación a clases resistentes bastante superiores.

- Para el abeto blanco puede ser interesante declarar, además de la clase resistente, el valor característico del módulo de elasticidad. En muchas ocasiones el criterio más exigente en el dimensionado de estructuras es la deformación, por lo que el uso del valor real, muy por encima del valor de la clase resistente, puede optimizar el uso de esta madera.

- En ambas poblaciones, española y Pirineos, existe un lote cuyo valor característico de resistencia a flexión multiplicado por 1,2 es inferior al valor medio de los lotes. En la población española esto implica una reducción del valor característico de 22,10 N/mm² a 21,10 N/mm² lo que implica una reducción de la clase resistente asignada de C22 a C20 y evidencia o una clasificación inadecuada o una muestra mal estructurada. En la población Pirineos, en cambio, se baja de 22,51 N/mm² a 22,21 N/mm² sin variación de clase resistente.

- La población Pirineos, que incluye a la población española como ámbito de aplicación la incluye también naturalmente en el proceso de cálculo. La muestra empleada para la evaluación de clase resistente está formada por los lotes de la población española más un lote que incluye probetas de origen francés. La muestra de la población Pirineos es más compacta y homogénea que la población española. Las piezas de origen francés se integran bien en la muestra, la completan y dan más seguridad a la clasificación de la madera española.

- Se propone la inclusión del abeto blanco de España, al estar incluida en la población Pirineos, en la UNE 56544 con una clase visual MEG para grosor de la pieza igual o superior a 70 mm y una clase resistente C22.

- Teniendo en cuenta la compacidad de la muestra de la población Pirineos, puede resultar interesante la creación de una norma de clasificación visual plurinacional, España y Francia, para la madera de abeto, integrando la población Pirineos con el resto de regiones de procedencia francesas.

7.4 Uso de lotes incompletos y ficticios

- El uso de lotes con un número de piezas próximo pero menor de 40 supone la penalización del valor característico del MOR. El método establecido para el cálculo del 5º percentil del MOR, en lotes de menos de 40 piezas, da lugar a que el valor característico se corresponda con el valor más pequeño del lote y muy posiblemente llegue a definir el valor característico de la especie. Sin embargo puede considerarse su uso para ampliar la muestra cuando el número de lotes sea bajo y se penalice mucho el valor característico por esta causa; en este caso hay que tener la precaución de que no haya una sobre estimación de los valores característicos, comparando las muestras y aceptándolas exclusivamente cuando no incrementan el valor medio y se integren bien en la muestra. El valor de MOE de estos lotes incompletos, al tratarse de un valor medio, es más representativo.

- La distribución aleatoria de un conjunto de probetas en lotes ficticios más pequeños pone de manifiesto el riesgo de agrupar en lotes las probetas menos resistentes, y de esta manera obtener un valor característico inferior al real para el percentil 5. Del mismo modo se podrían dispersar probetas que tienen el mismo origen y producir un resultado sobrestimado de la resistencia. No se recomienda esta práctica.

7.5 Futuras líneas de investigación

- El estudio de piezas de gran escuadría para otras especies españolas permitirá consolidar o revisar los criterios empleados. En particular el uso de un criterio de seguridad como es la limitación del valor absoluto para el tamaño máximo de nudo no agrupado podría ser explorado en otras especies, ya caracterizadas o pendientes de serlo.

- El uso de técnicas no destructivas para la clasificación estructural de la madera ha demostrado ser una eficaz herramienta, y podría ser aplicado al abeto blanco. Este uso se puede realizar tanto para la comercialización de madera nueva como para el control de madera bien en recepción bien en madera ya colocada en obra.

- La influencia del tamaño de la sección en el abeto blanco, y su variación con la resistencia/calidad de la pieza, son campos a explorar, dados los resultados obtenidos en el presente trabajo.

- La continuación de ensayos con el abeto puede permitir obtener una clase resistente de gran resistencia.

- La revisión de las clases resistentes, quizás en dos series, que permita reflejar mejor el valor característico del módulo de elasticidad longitudinal.

- La elaboración de una norma de clasificación visual única para la madera de abeto de España y Francia.

Bibliografía

Acuña, L. [et al.]. (2007) **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.

Adell, F.J. (2005). **Comparación de las normas de clasificación de madera estructural española (UNE 56544) y alemana (DIN 4074) para madera de pino silvestre (Pinus sylvestris L.) de procedencia alemana**. Proyecto Fin de Carrera. ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

Alba Sánchez, F; López Sáez, J.A; , Benito de Pardo, B; López Merino, L. (2009) **Historia Paleocológica y modelo de idoneidad de Abies Alba Mill. en la Cordillera Pirenaica**. Pirineos, 164.

Álvarez, L.; Basterra, A.; Casado, M.; Acuña, L.(2005) **Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera**. En: I Jornadas de Investigación en Construcción. Madrid: IETcc CSIC

Apiloaza, L. A. (2000) **Multiple trait improvement of Radiata Pine**. Tesis doctoral, Massey University. Palmerston north. New Zealand

Anthony, R.W.; Pandey, A.K.; Arnette, C.G. (1998a). **Inspection and assessment of timber piles**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering. Montreaux, Switzerland. 17 - 20 August 1998. Vol. 1. P. 432 - 439.

Argüelles, A.; Arriaga, F.; Martínez, J.J. (2000). **Estructuras de madera: diseño y cálculo**. Editorial ITIM, Madrid. 663 p.

Arriaga, F.; Esteban, M.; Relea, E. (2005a). **Evaluación de la capacidad portante de piezas de gruesa escuadría de madera de conífera en estructuras existentes**. Materiales de Construcción. Vol. 55, nº 280. P. 43 - 52.

Arriaga, F.; García, L.; Gebremedhin, K.G.; Peraza, F. (1992). **Grading and load carrying capacity of old timber beams**. International Summer Meeting, American Society of Agricultural Engineers. Paper nº 92 4068. American Society of Agricultural Engineers, ASAE. Charlotte, North Carolina, USA. 21 - 24 jun 1992.

Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M.(2009) **Productos de madera para la construcción** documento de aplicación del CTE. Madrid : Confemadera, 2009, 78p.

Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M. (2005b). **Assessment of strength and stiffness properties using longitudinal stress wave on structural gross cross section timber of radiata pine (Pinus radiata D. Don)**. Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Hannover 2 - 4 may 2005. Published by Shaker Verlag, Germany. P. 101 - 110.

Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M.; Fernández-Golfín, J.I. (2006). **Structural Tali timber (Erythrophleum ivorense A. Chev., Erythrophleum suaveolens Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods**. Holz als Roh- und Werkstoff, 64. P. 357 - 362.

- Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Fernández-Golfín, J.I.; Esteban, M. (2005c). **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**. Actas de las I Jornadas de Investigación en Construcción. Madrid 2 - 4 junio 2005. Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja". Consejo Superior de Investigaciones Científicas. P. 403 - 415.
- Arriaga, F.; Peraza, F.; Esteban, M. (2003). **Madera aserrada estructural**. Editorial AITIM. 159 p.
- Arriaga, F.; Peraza, F.; Esteban, M.; Bobadilla, I.; García, F. (2002). **Intervención en estructuras de madera**. Editorial AITIM. 476 p.
- Arriaga, F.; Peraza Sánchez, F.; García Esteban, L.(2008) **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.
- Bacher, M. (2008) **Comparison of different machine strength grading principles**. En: Conference COST E53, 29-30 October, Delft, The Netherlands.
- Badía, M. (1999) **Caracterización Mecánica de la Madera de Abeto (*Abies alba* Mill.) a partir de ensayos con probetas de tamaño estructural**. Proyecto Final de Carrera. Universitat de Lleida
- Baño, V.; Santos, J. C.; Vivas, J.; Rodríguez, S.; Vega, A.; Crews, K. (2011) **A study of the influence of different types of timber footbridges on the vibration natural frequency**. En: WoodNDT2011 Sopron Hungary
- Barrett, J.D.; Lau, W.(1994) **Canadian lumber properties**. Ottawa : Canadian Wood Council, 1994.
- Barrett, J.D. (1974). **Effect of size on tension perpendicular to grain strength of Douglas fir**. *Wood and fibre Science*, 6 (2). P. 126 - 143.
- Barrett, J.D.; Fewell, A.R. (1990). **Size factors for the bending and tensions strength of structural timber**. *Proceedings of CIB-W18*. Paper 23-10-3. Lisbon, Portugal. September, 1990.
- Barrett, J.D.; Lau, W. (1994). **Canadian Lumber Properties**. Canadian Wood Council. Ottawa, Ontario, Canada. 346 p.
- Barrett, J.D.; Lam, F.; Lau, W. (1995). **Size effects in visually graded softwood structural lumber**. *Journal of Mat. in Civil Eng.*, 7 (1). P. 19 - 30.
- Basterra, A.; Casado, M.; Acuña, L.; Pinazo, O. (2006) **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. (2002) **Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties**. *Wood Science and Technology*, no. 36, pp. 197–212.
- Bengtsson, D. (2006). **Grading Structural Timber**. Power Point presentation of the COST E53 International Workshop on State of the Art in Quality Control. Sopron, Hungary. 8 - 10 Nov. 2006.

- Benitez, M.; Li, J. (2002). **Static and dynamic evaluation of a timber bridge. Proceedings of the 7th World Conference on Timber Engineering.** 12 -15 August 2002. Shah Alam, Malaysia. Vol II. P. 385 - 393.
- Bergman, R.H.; Shahbender, R.A. (1958). **Effect of statically applied stresses on the velocity of propagation of ultrasonic waves.** *Journal of Applied Physics*, vol. 29.
- Birks, A.S.; Green, R.E.; McIntire, P. (1991). **Nondestructive testing handbook.** Volume 7: **Ultrasonic testing.** 2nd Ed. **American Society for Nondestructive Testing.** 893 p.
- Blanco, E., Casado, M.A., Costa, M., Y otros. (1997); **Los Bosques Ibéricos. Una interpretación geobotánica.** Edit. Planeta. 571 pp.
- Blass, H.J.; Frese, M. (2004). **Combined visual and machine strength grading. Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering.** 14 -17 June 2004. Lahti, Finland. Vol II. P. 185 - 190.
- Blevins, R.D. 1993. **Formulas for natural frequency and mode shapes.** Florida, USA: Krieger Publishing Company. 492 p.
- Bobadilla, I.; Íñiguez, G.; Arriaga, F. (2009) **Técnicas no destructivas en la madera I: El penetrómetro.** Boletín de información técnica AITIM, no 260, pp. 66-71.
- Bobadilla, I.; Esteban, M.; Íñiguez, G. Arriaga, F., y Ballarín, D. Palacios, J. (2007) **Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del modulo de elasticidad.** *Informes de la construcción* , vol. 59, no, 506, pp. 107-116.
- Bodig, J.; Goodman, J.R. (1973). **Prediction of elastic parameters for wood.** *Wood Science and Technology*, 5 (4). P. 249 - 264.
- Bohannon, B. (1966) **Effect of size on bending strength of wood members.** **USDA Forest Service, Research Paper. FPL 56. Forest Products Laboratory.** May 30 p.
- Boström, L. (1997). **Assessment of Dynagrade timber strength grading machine.** **Swedish National Testing and Research Institute Building Technology**, 96B2, 1314B.
- Boström, L. (1998). **Setting values for the Dynagrade timber strength grading machine.** SP AR 1999:12.
- Brancheriau, L.; Bailleres, H.(2006) **Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review.** *Wood Science and Technology* ,no 36, pp. 47-365
- Brashaw, B.K.; Vatalaro, R.J.; Wacker, J.P.; Ross, R.J. (2005a). **Condition assessment of timber bridges, 1. Evaluation of a Micro-Drilling Resistance Tool.** **USDA Forest Service, General Technical Report. FPL-GTR-160. Forest Products Laboratory.** April 2005. 8 p.
- Brashaw, B.K.; Vatalaro, R.J.; Wacker, J.P.; Ross, R.J. (2005b). **Condition assessment of timber bridges, 2. Evaluation of Several Stress-Wave Tools.** **USDA Forest Service, General Technical Report. FPL-GTR-160. Forest Products Laboratory.** July 2005. 14 p.

Broto, M. (2010). **Innovación y adaptación. Oportunidades para los viejos productos forestales**. Capítulo de libro en: Conferencias y ponencias del 5º Congreso Forestal Español. Madrid. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales.

Broto, M. (2008a). **La oportunidad del rebollo (Quercus pyrenaica) de Castilla y León**. Capítulo de libro. Utilización de Quercus pyrenaica Willd. de Castilla y León en el envejecimiento de vinos. INIA, Madrid.

Broto, M. (2008b). **La Madera: emoción y técnica**. Capítulo de libro. Acción Urbana. Curso de Mobiliario Urbano 2007-2008. Universidad de Valladolid. Valladolid.

Broto, M.; Villanueva; J.L.; Lafuente, E.; Rodríguez, F. (2007) **Evaluación de la resistencia por frecuencia de resonancia. Un caso práctico**. III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales. Buenos Aires (Argentina).

Broto, M, Lizarralde, I. (2006) **Pino Soria Burgos: primer sello de calidad de la madera española**. Comercio Industria Madera (145):82-84, 2006.

Broto, M.; Lizarralde, I. (2005). **Perspectives for Spanish Juniper (Juniperus Thurifera L.) and Pyrenean Oak (Quercus Pyrenaica Willd.) wood**. SUBERWOOD 2005.

Broto, M.; Rodríguez, F.; Badía, M.; Ávila, A.; Civit, J. (2001) **Propiedades Mecánicas del Abeto (Abies alba Mill.) del Valle de Arán**. III Congreso Forestal Español. Granada 2001.

Broto, M.; Badía, M.; Rodríguez, F.; García, A. (2000) **Clasificación estructural de los productos de Maderas Safont Pedarrós**. V Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Lleida 4-6 de Octubre de 2000.

Broto, M.; Fernandez, A.; García, A. (1997). **Estudio de muros criba en madera**. I Congreso forestal Hispano-Luso II Congreso Forestal Español. 1997.

Broto, M.; Iglesias, J.M.; Fernández, A.; García, A. (1996) **La madera como material alternativo en la ingeniería de proyectos**. III Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Barcelona 1996.

Bucur, V. (1979). **Le comportement a la rupture du bois massif étudié para la méthode ultrasonique d'impulsion**. 4e Congres Français de Mécanique. Nancy, France. 4 - 7 Sep. 1979.

Bucur, V. (1980). **Modifications des propriétés acoustiques du bois de résonance sous l'effet de sollicitations de longue durée**. Annals of Forest Science, 37 (3). P. 249 - 264.

Bucur, V. (2003). **Nondestructive characterization and imaging of wood**. Heidelberg: Springer Verlag. 325 p.

Bucur, V.; Archer, R.R. (1984). **Elastic constants for wood by an ultrasonic method**. Wood Science and Technology, 18. P. 255 - 256.

Bucur, V.; Böhnke, I. (1994). **Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood**. Ultrasonics, 32 (5). P. 385 - 390.

Bucur, V.; Feeney, F. (1992). **Attenuation of ultrasound in solid wood**. Ultrasonics, 30 (2). P. 76 - 81.

Burdon, R.D.:(2004) [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, vol. 50, no. 4, pp. 399-415.

Cai, Z.; Hunt, M.O.; Ross, R.J.; Soltis, L.A. (2002). **Screw withdrawal: a means to evaluate densities of in-situ wood members.** 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. P. 277 – 281

Calderoni, C.; (2010) [et al.]. **Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements.** Engineering Structures no. 32, pp. 442-448.

Carballo, J.; Hermoso Prieto, E.; Fernández-Golfín, J.I.(2007) **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.

Carballo, J.; Hermoso Prieto, E.; Díez Barra, R. (2009) **Ensayos no destructivos sobre madera estructural.Una revisión de 30 años en España.** www.dialnet.unirioja.es.

Casado, M. y Acuña, L., 2000. **La madera en la construcción.** E.T.S. Ingenierías Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid. Instituto Tecnológico Agrario y Agroalimentario.

Casado, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; Basterra, A. (2010) [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 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

Casas, L. (2005). **Parámetros indirectos de clasificación en piezas de madera estructural puesta en servicio. Análisis y correlación con la capacidad resistente real.** Proyecto Fin de Carrera. EUIT Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.

Ceccotti, A.; Togni, M. (1996). NDT on ancient timber beams: **Assessment of strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods.** Proceedings 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Lausanne, Switzerland. 26 - 28 August 1996. Edited by J. L. Sandoz. P. 379 - 388.

Choi, F. C.; Li, J.; Samali, B.; Crews, K. (2007) **An Experimental study on damage detection of structures using a timber beam.** Journal of Mechanical Science and Technology, no. 21, pp. 903-907.

Chui, Y.H. (1991). **Simultaneous evaluation of bending and shear modulus of Wood and the influence of knots on these parameters.** Wood Science and Technology, 25. P. 125 - 134.

Civit, J. (2000) **Influència del tamany de la secció en les propietats mecàniques de la fusta d'abet a partir d'assaigs amb provetes de tamany estructural**. Proyecto Final de Carrera. Universitat de Lleida

Collardet, J.; Besset, J. (1988) **Les bois commerciaux: les résineux (conifères)**. Tome I. Paris : Editions H. Vial & Centre Technique du Bois et de l'Ameublement,

Colling, F. (1986). **Influence of volume and stress distribution of the shear strength and tensile strength perpendicular to grain. Proceedings of the CIB-W18**. Paper 19-12-3. Florence, Italy. September, 1986.

Conde, M. (2007) **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, vol 57, no. 288, pp. 49-59.

Conde, M. (2003). **Caracterización de la madera estructural de Pinus nigra Subs. salzmannii**. Tesis Doctoral. ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

Conde, M., 2004. **Caracterización de la madera estructural de Pinus nigra subsp. Salzmannii**. Tesis doctoral de la Escuela Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, España.

Cown, D.J. (1982). **Use of the Pilodyn wood tester for estimating wood density in standing trees. Influence of site and tree age**. New Zealand Forestry Service. FRI. Bulletin 13. 13 p.

Crews, K.; Samali, B.; Li, J. (2004a). **Reliable assessment of aged timber bridges using dynamic procedures. Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering**. 14 -17 June 2004. Lahti, Finland. Vol II. P. 295 - 300.

Crews, K.; Samali, B.; Li, J.; Bakoss, S.; Champion, C. (2004b). **Testing and assessment procedures to facilitate the management of timber bridge assets. Proceedings of the 3rd CECAR - Civil Engineering Conference in the Asian Region. Seoul, Korea**. 16 -19 August 2004. 15 p.

Delibes, A. (1984a). **Estructuras de hormigón armado: técnicas de inspección. Curso de rehabilitación. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid**. Tomo 5. La estructura. P. 83 - 120.

Delibes, A. (1984b). **Estructuras metálicas: técnicas de inspección. Curso de rehabilitación. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid**. Tomo 5. La estructura. P. 121 - 150.

Denzler, J.K.; Diebold, R.; Glos, P. (2005). **Machine strength grading. Commercially used grading machines. Current developments. Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**. Hannover, 2 - 4 may 2005. Published by Shaker Verlag, Germany. P. 11 - 16.

De Oliveira, A.J. (2005). **Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour**. Tesis Doctoral. Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Portugal.

Dickson R.L., (2004) [et al.]. **Acoustic Segregation of Pinus Radiata logs for sawmilling**. New Zealand Journal of Forestry Science, vol. 34, no. 2, pp. 175-189

Díez, M.R.; Conde, M.; Fernández-Golfín, J.I.; Roskopf, S. (2000). **Clasificación visual de madera estructural de pino laricio: Comparación de resultados usando las normas UNE 56.544 y DIN 4074.** *Revista Investigación Agraria*, 9 (2). P. 375 - 380.

Díez, M.R.; Fernández-Golfín, J.I. (1998). **Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de *P. sylvestris* L.** *Revista de Investigación Agraria*, 1 (2). P. 41 - 53.

Díez, M.R.; Fernández-Golfín, J.I.; Hermoso, E. (2001). **Deformaciones en madera estructural: causas y control.** *Revista de Investigación Agraria*, 10 (2). P. 245 - 252.

Dill-Langer, G.; Aicher, S.; Bernauer, W. (2005a). **Reflection measurements at timber glue-lines by means of ultrasound shear waves.** *Otto-Graf-Journal*, 16. P. 273 - 284.

Dill-Langer, G.; Bernauer, W.; Aicher, S. (2005b). **Inspection of glue-lines of gluelaminated timber by means of ultrasonic testing.** *Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.* Hannover 2 - 4 may 2005. Published by Shaker Verlag, Germany. P. 49 - 60.

Divos, F. (1994a). **Screw withdrawal force as a strength predictor.** *Proceedings of the 1st European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood.* Sopron, Hungary, 21 - 23 September 1994.

Divos, F. (2002). **Portable Lumber Grader.** *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. (2004). **Portable Lumber Grader. Software and hardware guide.** Version 2.0 Fakopp Enterprise. [Http://www.fakopp.com/download/PLG_Guide.pdf](http://www.fakopp.com/download/PLG_Guide.pdf)

Divos, F. (2005a). **Course in Non-Destructive Testing of Wood. Apuntes y presentaciones del curso. Madrid 13 - 16 junio 2005.** ETS Ingenieros de Montes - ETS Arquitectura, UPM, Madrid.

Divos, F.; Daniel, I.; Hodasz, H.; Jarasi, J. (1994b). **Experimental investigation of Thirteen Strength Predictor Parameters of Coniferous Wood.** *Proceedings of the 1st European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood.* Sopron, Hungary, 21 - 23 September 1994.

Divos, F.; Denes, L.; Íñiguez, G. (2005b). **Effect of cross-sectional change of a board specimen on stress wave velocity determination.** *Holzforshung*, 59. P. 230 - 231.

Divos, F.; Németh, L.; Bej3, L. (1998). **Evaluation of the wooden structure of a baroque palace in Papa, Hungary.** *Proceedings of the 11th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.* Madison, WI, USA. 9 - 11 September 1998. Edited by D. Pollock. P. 153 - 160.

Divos, F.; Tanaka, T. (1997). **Lumber strength estimation by multiple regression.** *Holzforshung*, 51. P. 467 - 471.

Divos, F.; Tanaka, T. (2005c). **Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood.** *Acta Silvatica et Lignatia Hungarica*, 1. P. 105 - 110.

Ducl3s, J.J (2008). **Caracterización mecánica de la madera de "Abies alba" Mill.** Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Valladolid.

EA. European co-operation for Accreditation. (1997). **Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration**. Document EAL-R2.

ENAC. (1998). **Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones**. Documento CEA-ENAC-LC/02. 22 p.

ENAC. (2005). **Guía para la expresión de la incertidumbre en los ensayos cuantitativos**. Documento G-ENAC-09. 21 p.

Emerson, R.N.; Pollock, D.G.; Kainz, J.A.; Fridley, K.J.; McLean, D.I.; Ross, R.J. (1998). **Non-destructive evaluation techniques for timber bridges**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering. Montreaux, Switzerland. 17 - 20 August 1998. Vol. 1. P. 670 - 677.

Erikson, R. (1997). **Mechanical Grading Opportunities for Lumber Sawn from Small-Diameter Logs**. Master Thesis. Forest Products Department. University of Idaho, USA.

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., (2006) **Modelling structural pathologies in King trusses**. World Conference on Timber Engineering. (WCTE 2006), Portland, Oregón.

Esteban, M. (2003). **Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera**. Tesis Doctoral. ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

Falk, R.H.; Patton-Mallory, M.; McDonald, K.A. (1988). **Nondestructive testing of wood products and structures: state-of-the-art and research needs**. Proceedings of the Conference on Nondestructive Testing and Evaluation for Manufacturing and Construction. Champaign, Illinois, USA. 9 - 12 August 1988. P. 137 - 147.

Feio, A.O.; Machado, J.; Lourencço, P.B. (2004) **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. (2005) **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. (2008). **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.; Díez, M.R. (1998). **Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56.544**. *Materiales de Construcción*, 48 (252). P. 45 - 59.

Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R., 1994. **Influencia de la anchura del anillo de crecimiento en la densidad y otras propiedades físico-mecánicas de la madera estructural**. *Revista Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 3(2): 211-219.

Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R.; Baonza, M.V.; Gutiérrez, A.; Hermoso, E.; Conde, M.; Van den Eynde, V. (2001a). **Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de pino laricio (*Pinus nigra*)**. *Revista de Investigación Agraria*, 10 (2). P. 311 - 332.

Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R.; Gutiérrez, A. (1997). **Caracterización mecánica de la madera aserrada de pino silvestre de los sistemas Central e Ibérico mediante probetas de tamaño estructural**. *Revista de Investigación Agraria*, 6 (1-2). P. 183 - 215.

Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R.; Hermoso, E. (2001b). **Análisis y estado del arte de la técnica de clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural**. *Revista de Investigación Agraria*, 10 (1). P. 5 - 20.

Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R.; Hermoso, E. (2003). **Relaciones entre las variables clasificadoras de la madera estructural de los pinos silvestres y laricio de procedencia española**. *Materiales de Construcción*, 270 (53). P. 45 - 55.

Fernández-Golfín, J.I.; Gutiérrez, A.; Baonza, M.V.; Díez, M.R. (1995). **Características físico-mecánicas de las maderas de especies de crecimiento rápido de procedencia española**. *Revista de Investigación Agraria* 4, (2). P. 179 - 188.

Fernández-Golfín, J.I.; Hermoso, E.; Díez, M.R. (2002). **Análisis del efecto del volumen sobre la resistencia a flexión de la madera de los pinos silvestre y laricio de procedencia española**. *Materiales de Construcción*, 268. P. 43 - 55.

Foschi, R.O.; Barrett, J.D. (1975). **Longitudinal shear strength of Douglas fir**. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 3 (2). P. 198 - 208.

Freas, A.D.; Selbo, M.L. (1954). **Fabrication and design of glued laminated Wood structural members**. USDA Technical Bulletin, 1069.

Galán, R., 2006. **Caracterización estructural de madera de mediana escuadría para *Pinus pinaster* Ait. Procedencia Meseta Castellana**. Proyecto de Fin de Carrera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid.

Gallagin, W.L.; Pellerin, R.F. (1964). **Nondestructive Testing of Structural Lumber**. *Materials Evaluation*, 22: 4.

García, L., Guindeo, A, Peraza, C. y de Palacio, P., 2003. **La madera y su anatomía**. Coed. Conde del Valle Salazar, Multiprensa y AITIM. Madrid, España. 327 pp.

García, L. et al, 2008. **Variation of impact bending in the wood of *Pinus sylvestris* L. in relation to its position in the tree**. *Forest products journal*. Vol. 58, No. 3.

González, B., 2008. **Variabilidad de las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Abies alba* Mill. del monte de Montinier (Huesca) según su posición en el árbol** Tesis doctoral de la Escuela Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, España.

González, B.; García, L.; de Palacios, P.; García, F.; Guindeo, A.(2013) **Caracterización físico-mecánica de la madera de *Abies alba* Miller procedente del pirineo español mediante probetas libres de defectos**. *Informes de la Construcción*, Vol 65, No 530

- Gori, R.; Paggiarin, C. (1999). **Non destructive vibration test on timber truss elements**. Proceedings of the 1st RILEM Symposium on Timber Engineering. Stockholm, Sweden. 13 - 15 September 1999. P. 285 - 294.
- Görlacher, R. (1986). **A dynamic method for determining elastic properties of wood**. Proceedings of the International Council for Building Research Studies and Documentation Meeting. WG 18. September 1986. Florence, Italy. 21 p.
- Graff, K.F. (1991). **Wave motion in elastic solids**. Dover Publications, Inc., New York. 649 p.
- Guindeo, A., García, L., Peraza, F., Arriaga, F., Kasner, C., Medina, G., Touza, M., De Palacios, P., 1997; **Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario**. ALTIM, 1997. 755 pp.
- Gutiérrez, A. y Plaza, F., 1967. **Características físico-mecánicas de las maderas españolas**. Ed. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid, España. 103 pp.
- Habermehl, A.; Ridder, H.W. (1992). **Computer Tomographie am Baum (Computer tomography for tree)**. Materialprüfung, 34. P. 325 - 329 and 357 - 360.
- Halabe, U.B.; GangaRao, H.V.S.; Petro, S.H.; Hota, V.R. (1996). **Assessment of defects and mechanical properties of wood members using ultrasonic frequency analysis**. Materials Evaluation, 54: 2. P. 314 - 322.
- Hanhijärvi, A.; Ranta-Maunus, A.; Turk, G. (2005). **Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques**. Report of the Combigrade-projectphase Espoo, Finland. VTT Publications 568. 81 p. + app. 6 p.
- 1.
- Hearmon, R.F.S. (1966). **Theory of the vibration testing of wood**. Forest Products Journal, 16 (8). P. 29 - 40.
- Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I. y Díez, M.R., 2002. **Madera estructural del pino silvestre. Caracterización mecánica**. Revista Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 11(2): 425-440.
- Hermoso, E.; Carballo, J.; Fernández-Golfín, J.I. (2007a) **Structural Characterization of *Pinus Radiata* D. Don Timber from Pais Vasco (Spain) According to Standard Modifications**. Maderas: Ciencia y Tecnología, 2007, vol. 9, no. 3, pp. 223-232.
- Hermoso, E.; Carballo, J.; Fernández-Golfín, J.I. (2007b) **Revisión de la caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del norte de España acorde a las modificaciones normativas**. II Congreso Iberoamericano de investigación y desarrollo de productos forestales , 2007, pp. 1-10.
- Hermoso, E.; Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R. (2003a). **Mechanical characterization of timber according to European standards from Spanish provenances of Scots Pine**. Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales, 2003, vol. 12 , no 3, pp. 103-110.
- Hermoso, E.; Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R. (2003b). **Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos**. Actas del 10º Congreso Nacional END. Asociación Española de Ensayos No Destructivos. Cartagena. 18 – 20 Junio 2003.

Hermoso, E.; Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R. (2002). **Análisis del factor de altura kh en la madera aserrada estructural de pino silvestre**. Revista de Investigación Agraria, 11 (2). P. 441 - 448.

Hermoso, E. (2001). **Caracterización mecánica de la madera estructural de Pinus sylvestris L.** Tesis Doctoral. ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

Hu, C.; Afzal, M.T. (2006). **A statistical algorithm for comparing mode shapes of vibration testing before and after damage in timbers**. Journal of Wood Science, 52: 4. P. 348 - 352.

Ibáñez, M. (2006). **Análisis estructural de las Casas Colgadas de Cuenca: casa del canónigo Gonzalo González de Cañamares**. Proyecto Fin de Carrera. ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

Iglesias, J.M.; Bradineras, F.J.; Fernández, A.; Broto, M. (1997) **Utilización de la madera como material estructural en la construcción de obras de paso**. I Congreso forestal Hispano-Luso II Congreso Forestal Español. 1997.

Itagaki, N.; Mihashi, H.; Ninomiya, S. (1998). **Knot's influence on tensile strength of timber**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering. Montreaux, Switzerland. 17 - 20 August 1998. Vol. 2. P. 780 - 781.

ILAC. (2002). **Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard ISO/IEC 17025**. ILAC-G17:2002. 8 p.

Iñiguez, G. (2007) **Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural**. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Iñiguez, G.; Arriaga, F.; Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R.; Hermoso, E.; Mier, R. (2005). **Clasificación visual de la madera de pino radiata (Pinus radiata D. Don) en piezas de gran escuadría para uso estructural**. Actas del 4º Congreso Forestal Español. Zaragoza, España. 26 - 30 Septiembre 2005.

Ivkovic, M. [et al.]. (2009) **Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine**. Wood science and technology, vol. 43, no. 3-4, pp. 237-257 .

Jambrina S., 2005. **Anatomía comparada de la madera de Abies pinsapo Boiss. Y sus dos variedades marroquíes**. Proyecto de Fin de Carrera de la Escuela de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid. 198 pp.

Jayne, B.A. (1959). **Vibrational properties of wood as indices of quality**. Forest Products Journal, 9 (11). P. 413 - 416.

Kaiserlik, J.H.; Pellerin, R.F. (1977). **Stress wave attenuation as an indicator of lumber strength**. Forest Products Journal, 27 (6). P. 39 - 43.

Kasal, B. (2011a) **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). (2011b) **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. (2004) **Advances in situ evaluation of timber structures**. Progress in Structural Engineering and Materials. , vol. 6, no. 2, pp. 94-103..

Kawamoto, S.; Williams, R.S. (2002). **Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites. A review**. USDA Forest Service, General Technical Report. FPL-GTR-134. Forest Products Laboratory. December 2002. 16 p.

Kessel, M.H.; Plinke, B.; Augustin, R.; Huse, M. (1998). **Strength grading of construction timber with large cross sections**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering. Montreaux, Switzerland. 17 - 20 August 1998. Vol. 1. P. 557 - 562.

Kollmann, F. (1965). **Relationship between elasticity and bending strength of wood**. Proceedings of the 2nd International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Spokane, WA, USA. April 1965. P. 69 - 93.

Kuklík, P.; Dolejs, J. (1998). **Nondestructive evaluation of structural timber**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering. Montreaux, Switzerland. 17 - 20 August 1998. Vol. 1. P. 692 - 699.

Laffarga, J. (1992). **Aplicación de la propagación de ondas ultrasónicas para el estudio de las maderas**. Revista de la Edificación, 11. P. 21 - 28.

Lafuente, E.; Broto, M.; De Lafuente, J; Sanz, A. (2006) **Estudio de las propiedades físico mecánicas de juniperus thurifera**. III Coloquio internacional sobre sabinares y enebrales (genero Juniperus): Ecología y Gestión Forestal Sostenible. Soria (España)

Lam, F.; Varoglu, E. (1990). **Effect of length on the tensile strength of lumber**. Forest Products Journal, 40 (5). P. 37 - 42.

Lee, S.-J.; Kim, K.-M.; Lee, J.-J. (2006). **Improvement of the ultrasonic and X-ray CT techniques for field application**. Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering. Portland, Oregon, USA. 6 - 10 August 2006. 8 p.

Lemmens, J. W. (1989). **Impulse excitation: a technique for dynamic modulus measurement**. Proceedings of the Symposium on Dynamic Modulus Measurements. Kansas City, Missouri, USA. 25 - 26 May 1989. P. 90 - 99.

Lenz, O., 1979; **“Le bois des coniferes d'une station secharde du pied du Jura (Chassagne)”**.Mitteilungen,-Eidgenossische-Anstalt-fur-das-Forstliche-Versuchswesen, -Switzerland. 1979, 55: 3, 235-295 pp.

Li, J.; Samali, B.; Crews, K. (2004). **Determining individual member stiffness of bridge structures using a simple dynamic procedure**. Acoustics Australia, 32 (1). P. 9 - 12.

Lizarralde, I.; Broto, M.; Rodríguez, F.; Bravo, F. (2008). **Taper equations and wood products assessing the carbon flow of the forest through its products**. Capítulo del libro: Managing forest ecosystems and climate change. Ed. Springer. Dordrecht, Germany.

Lizarralde, I.; Broto, M.; Rodríguez, F. (2007). **Ciclo de vida de los productos forestales. Impacto sobre la fijación de CO₂**. Capítulo del libro: El papel de los bosques en la mitigación del cambio climático. Fundación Gas Natural. Barcelona.

López, J.A.; Staffieri, G.M. (2002). **Correlaciones genéticas entre pilodyn y densidad de la madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* en la Mesopotamia argentina**. Actas de las IX Jornadas Técnicas Forestales. Mayo, 2002. Eldorado, Misiones, Argentina. 5 p.

Low, A.J., 1964. **Compression wood in conifers: a review of literature**. Forest Abstr 25 (3, 4): 1-13 pp.

Machado, J.S.; Sardina, R.; Cruz, H. (1998). **Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds**. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering. Montreaux, Switzerland. 17 - 20 August 1998. Vol. 2. P. 304 - 311.

Machado, J.S.; Sardinha, R.A.; Cruz, H.P. (2004). **Feasibility of automatic detection of knots in maritime pine timber by acousto-ultrasonic scanning**. Wood Science and Technology, 38 (4). P. 277 - 284.

Machado, J.S. y Cruz, H.P., 2005. Within stem variation of Maritime Pine timber mechanical properties. Holz und Roh-und Werkstoff (2005) 63: 154-159 pp.

Madsen, B. (1992). **Structural behaviour of timber**. Timber Engineering Ltd, North Vancouver, BC, Canada. 405 p.

Madsen, T.L. (1980). **The efficiency of visual and mechanical stress grading of Norway spruce timber, and the possibilities of improving the methods by means of the Pilodyn instrument or additional annual ring width limits**. IUFRO Div. 5 Conference. 8 - 16 April 1980. Oxford, Great Britain.

Madsen, B.; Buchanan, A.I.-I. (1986). **Size effects in timber explained by a modified Weakest-link theory**. Canadian Journal of Civil Engineering, 13 (2). P. 218 - 232.

Marca de Garantía Pino Soria Burgos. <http://www.pinosoriaburgos.com>

Mariño, R.; Fernández Rodríguez, M^a. E.; Fernández Rodríguez, C. (2002) **Análisis comparativo de la densidad de la madera *Pinus Sylvestris* L. mediante la utilización del Resistógrafo**. Revista CISMadera, no. 9, pp. 60-70.

Martín, M.T.; Manrique, E.; Fernández, A. (1993a). **Estudio del comportamiento de la madera frente a las microondas**. Congreso Forestal Español. Lourizán, Pontevedra. Tomo IV. P. 261 - 266.

Martín, M.T.; Manrique, E.; Fernández, A. (1993b). **An experiment with microwave radiation to determine absorption coefficients and defects of wood**. Physics Education, 28 (6). P. 386 - 388.

Martínez, J.J.; 1992. **Características mecánicas de la madera de *Pinus pinaster* Ait. obtenidas a partir de ensayos con piezas de tamaño estructural**. Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Ingenieros de Montes. Tesis Doctoral.

Mateo, R. (2005). **Análisis de la influencia de las fendas en la capacidad resistente de piezas de madera**. Proyecto Fin de Carrera. ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

- Matheson, A. C. (2002) [et al.]. **Acoustic Segregation of Pinus Radiata Logs According to Stiffness**. Annals of Forest Science, vol. 59, no. 5-6, pp. 471-477.
- Matthews, B.; Zombori, B.; Divos, F. (1994). **The effect of moisture content and temperature on the stress-wave parameters**. Proceedings of the 1st European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood. Sopron, Hungary, 21 – 23 September 1994.
- Mattone, M. (2006). **The state of preservation of wooden structures: resistographic and X-ray tests**. Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering. Portland, Oregon, USA. 6 - 10 August 2006. 4 p.
- Mau, T.J. (1976). **Time and size effects for tension perpendicular to grain in wood**. Master Thesis. Department of Civil Engineering. University of British Columbia, Canada.
- Micko, M. M. (1982) [et al.]. **Determination of the wood specific gravity in standing white spruce using a pilodyn tester**. The Forestry Chronicle,. August pp.178-180.
- Mier, R. (2001). **Clasificación de madera aserrada estructural mediante inteligencia artificial: redes neuronales**. Proyecto Fin de Carrera. ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- Minster, J.; Drdácký, M.; Jirovsky, I.; Kloiber, M.; Micka, M.; Slízková, Z.; Václavík. P. (2006) **Diagnostic techniques to assess mechanical characteristics of historical timber**. En: Heritage, Weathering and Conservation. HWC – Madrid, 2006.
- Montón Lecumberri, J. (2012). **Clasificación Estructural de la Madera de Pinus Radiata procedente de Cataluña mediante métodos no destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural**. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Morison, A.M.; Van Karsen, C.D.; Evensen, H.A.; Ligon, J.B.; Erickson, J.R.; Ross, R.J.; Forsman, J.W. (2002). **Timber bridge evaluation: a global nondestructive approach using impact generated FRFs**. Proceedings of the 20th International Modal Analysis Conference. 4 -7 February 2002. Los Angeles, California, USA. P. 1567 - 1573.
- Moro, R. (2002) **Guía de los árboles de España**. Barcelona: Omega.
- Murphy, J.F. (1997). **Transverse vibration of a simply supported beam with symmetric overhang of arbitrary length**. Journal of Testing and Evaluation, 25 (5). P. 522 - 524.
- Newling, J.A.; Trayer, G.W. (1924). **Form factor of beams subjected to transverse loading only**. NACA report nº 181.
- Niedzielska. O., 1990; **“Wood characteristics of silver fir (Abies alba Mill.) originating from crops depleted by partial felling structure”**. Acta-Agraria-et-Silvestria.-Series-Silvestris. 1992, 30: 63-73 pp.
- Niedzielska. . O., 1985; **“Studies on chosen physical fir (Abies alba. Mill) wood properties in older age classes”**. Zeszyty-Naukowe-Akademii-Rolniczej-im.-Hugona-Kollataja-w-Krakowie,-Lesnictwo. Publ .1985, No. 16 (197), 81-92 pp.
- Niedzielska. O., 1987; **“Studies on selected mechanical properties of fir wood (Abies alba. Mill) of older age classes”**. Zeszyty-Naukowe-Akademii-Rolniczej-im.-Hugona-Kollataja-w-Krakowie,-Lesnictwo. Publ .1987, No. 17 (212), 85-93 pp.

Niedzielska. O., 1989; "**Physical properties of Abies alba wood from the Sacz Beskid and Gorce mountains**". Zeszyty-Naukowe-Akademii-Rolniczej-im.-Hugona-Kollataja-w-Krakowie,-Lesnictwo. Publ. 1990, No. 19 (236), 61-75 pp.

Niedzielska. O., 1989; "**Mechanical properties of Abies alba wood from the Sacz Beskid and Gorce mountains**". Zeszyty-Naukowe-Akademii-Rolniczej-im.-Hugona-Kollataja-w-Krakowie,-Lesnictwo. Publ. 1990, No. 19 (236), 77-88 pp.

Niemz, P.; Kucera, L.J.; Flisch, A.; Blaser, E. (1997). **Anwendung der Computertomographie an Holz (Computerized tomography of wood)**. Holz als Rohund Werkstoff, 55. P. 279 - 280.

Nocetti, M.; Bacher, M.; Brunetti, M.; Crivellaro, A.; Van de Kuilen J. (2010) **Machine grading of Italian structural timber: preliminary results on different wood species**. En : World Conference on Timber Engineering. WCTE. Riva del Garda, Italy.

O'Neil, H. (2005) **Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos**.

Olivio, R. (1996). **Ultrasonic Measurements in Wood**. Materials Evaluation, April. P.514 - 517.

Ortiz, J.; Martínez, J.J. (1991). **Características mecánicas de la madera de pino gallego, obtenidas a partir de ensayos con piezas de tamaño estructural**. *AITIM* 150:95-101.

Ovies, J., 2005. **Caracterización físico-mecánica de Abies pinsapo Boiss. De las tres procedencias españolas**. Proyecto de Fin de Carrera de la Escuela de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid. 99 pp

Palaia, L. (2008) [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.

Pedrotti, P.; Paganini, F.; Del Senno, M. (2000). **Longitudinal boring of beams**. Xylon International. Jul. - Aug. P. 72 - 75.

Pellerin, R.F.; Ross, R.J. (2002). **Nondestructive evaluation of wood**. Forest Products Society. Madison, WI, USA. 210 p.

Peña, D. (2002). **Regresión y diseño de experimentos**. Ciencias Sociales. Alianza Editorial. 744 p.

Peña, D. (2005). **Fundamentos de Estadística**. Ciencias Sociales. Alianza Ed. 683 p

Peraza, C., 1964. **Estudio de la madera de coníferas españolas y de la zona norte de Marruecos**. Documento nº 83. Ed. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Madrid, España. 112 pp.

Percival, D.H. (1981). **Portable E-tester for selecting structural component lumber**. Forest Products Journal, 31, (2). P. 39 - 42.

Perstorper, M. (1994). **Strength and stiffness prediction of timber using conventional and dynamic methods**. Proceedings of the 1st European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood. Sopron, Hungary, 21 - 23 September 1994. Edited by F. Divos. Vol. 2. P. 321 - 330.

- Perstorper, M. (1994). **Quality of structural timber. End-user requirements and performance control.** Tesis Doctoral. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Peterson, M.L.; Gutkowski, R.M.; Srinath, S.; Mittlestadt, C. (1998). **A method for prediction of in-situ strength of timber beams based on higher order elastic coefficients.** Forest Products Journal, 48 (10). P. 89 - 93.
- 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.
- Pluvinage, G., 1992; **“La rupture du Bois et de ses composites”.** Cépaduès-Éditions. Toulouse, 1992. 319 pp.
- Rajčić, V. (1998). **Neural network for classification based on non destructive testings.** Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering. Montreaux, Switzerland. 17 - 20 August 1998. Vol. 2. P. 318 - 325.
- Ramón, G. (2007). **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.
- Ramón, G.; Basterra, A.; Casado, M.; Acuña, L. (2005). **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.
- Ranta-Maunus; A. Turk, G. (2010). **Approach of dynamic production settings for machine strength grading.** En: 11th World Conference on Timber Engineering: WCTE 2010, Riva del Garda, Italy.
- Ravenshorst, G.J.P.; Van de Kuilen, J.W.G. (2006). **An innovative species independent strength grading model.** Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering. Portland, Oregon, USA. 6 - 10 August 2006. 8 p.
- Recuero, M. (1999). **Ingeniería acústica.** Editorial Paraninfo, Madrid. 670 p.
- Renn, R.; Kim, J.; Latchford, W. (1999). **Non destructive evaluation (NDE) of the stiffness and strength of in-situ timber structural members.** Proceedings of the 1st RILEM Symposium on Timber Engineering. Stockholm, Sweden. 13 - 15 September 1999. P. 275 - 284.
- Rinn, F. (1994). **Resistographic inspection of building timber.** Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference. Gold Coast, Australia. 11 - 15 July 1994. Vol. 2. P. 469 - 478.
- Rodríguez, C.; Rubio de Hita, P. (2000). **Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos.** Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. ETS de Arquitectura. Universidad de Sevilla. 165 p.
- Rodríguez, F; Broto, M.; Badia, M.; García, A.; Closa, S. (2001) **Estudio de la variación de las propiedades de la madera en el fuste.** Actas del III Congreso forestal Nacional. Mesas 7-10: 500-506

Ross, R.J.; Hunt, M.O. (2000). **Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspecting historic structures: A guide for use and interpretation.** USDA Forest Service, General Technical Report. FPL-GTR-119. Forest Products Laboratory. April 2000. 19 p.

Ross, R.J.; Geske, E.A.; Larson, G.L.; Murphy, J.F. (1991). **Transverse vibration nondestructive testing using a personal computer.** USDA Forest Service, Research Paper. FPL-RP-502. Forest Products Laboratory. August 1991. 19 p.

Ross, R.J.; Hunt, M.O.; Wang, X.; Soltis, L.A. (2001). **Floor vibration: a possible assessment method for historic buildings.** APT Bulletin, The Journal of Preservation Technology. Vol. XXII, 2 - 3. P. 23 - 25.

Ross, R.J.; Pellerin, R.F. (1994). **Nondestructive testing for assessing wood members in structures: a review.** USDA Forest Service, General Technical Report. FPL-GTR-70. Forest Products Laboratory. May 1994. 42 p.

Ruiz de la Torre, J.; Ceballos, L. (1971). **Árboles y arbustos de la España peninsular.** Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes,.

Salomon, B. (2000). **Charpente traditionnelle: qualité et classement des bois de forte section.** CTBA Info 85. P. 9 - 14.

Samali, B.; Li, J.; Crews, K.I.; Al-dawod, M. (2007) **Load rating of impaired bridges using a dynamic method. Electronic journal of Structural Engineering, Special Issue: Loading on Structures,** pp. 66 – 75.

Sandoz, J.L. (1989). **Grading of construction timber by ultrasound.** Wood Science and Technology, 23. P. 95 - 108.

Sandoz, J.L. (1994). **Reliability assurance of structural timber using ultrasound.** Proceedings of the 1st European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood. Sopron, Hungary, 21 - 23 September 1994.

Sandoz, J.L. (1996). **Structural timber quality assurance using ultrasound.** Proceedings of the 4th International Wood Engineering Conference. New Orleans, Louisiana, USA. 28 - 31 October 1996. Vol. III. 6 p.

Santaclara, O.; Fernández, A.; Merlo, E.; Guaita, M. (2009) **Técnicas no destructivas y ensayo mecánico en madera aserrada de gran escuadría de Pseudotsuga menziesii.** En V Congreso Nacional y II Congreso Ibérico Agrolgeniería, Lugo.

Sasaki, Y.; Ando, K. (1998). **Acoustoelastic phenomena of wood.** Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering. Montreaux, Switzerland. 17 - 20 August 1998. Vol. 2. P. 296 - 303.

Seoane, I.; Ortiz Gutiérrez., J. (1989) **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, no. 136, pp. 66-71.

Smith, S.M.; Morrell, J.J. (1986). **Correcting Pilodyn measurement of Douglas-fir for different moisture levels.** Forest Products Journal, 36 (1). P. 45 - 46.

- Sobue, N. (1986a). **Instantaneous measurement of elastic constants by analysis of the tap tone of wood. Application to flexural vibration of beams.** Mokuzaï Gakkaishi, 32 (4). P. 274 - 279.
- Sobue, N. (1986b). **Measurement of Young's modulus by the transient longitudinal vibration of wooden beams using a FFT spectrum analyser.** Mokuzaï Gakkaishi, 32 (9). P. 744 - 747.
- Sobue, N. (1988). **Simultaneous determination of Young's modulus and shear modulus of structural lumber of complex vibrations of bending and twisting.** Mokuzaï Gakkaishi, 34 (8). P. 652 - 657.
- Stephens, R.W.B.; Pollock, A.A. (1974). **Waveforms and frequency spectra of acoustic emission.** Journal of the Acoustic Society of America, 50. P. 904 - 910.
- Sunley, J. G., Curry, W. T. 1962. **A machine to stress grade timber.** NTI
- Szilard, J.(1982) **Ultrasonic testing: non conventional testing techniques.** Chichester [Eng.]. ; New York : Wiley, ISBN 0471279382.
- Tanaka, T.; Divos, F. (2000). **Thermographic inspection of wood.** Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Sopron, Hungary. 13 - 15 September 2000. Edited by F. Divos. P. 439 - 447.
- Tanaka, T.; Nagao, H.; Nakai, T. (1991). **Nondestructive evaluation of bending and tensile strength by longitudinal and transverse vibration lumber.** Proceedings of the 8th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Vancouver, WA, USA. 23 - 25 sep 1991. Published by Pullman, WA, Washington State University. P. 57 - 72.
- Taras, A.; Lordanescu, M. (1998). **NDE of wood utility poles integrating of gamma densitometrie and visual inspection.** Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering. Montreaux, Switzerland. 17 - 20 August 1998. Vol. 1. P. 626 - 633.
- Tseng, Y. J.; Hsu, M. F. (2008) **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
- 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
- Vallen, H. (2002). **AE Testing Fundamentals, Equipment, Applications.** NDT.net Journal, 7 (9). September, 2002.
- Van de Kuilen, J.W.G.; Ceccotti, A. (2006). **Analysis of statistical methods for the determination of characteristic values of Italian red spruce (Picea abies).** Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering. Portland, Oregon, USA. 6 - 10 August 2006. 8 p.
- Verkasalo, E. y Leban, J.M, 2002. **MOE y MOR in static bending of small clear specimens of Scots pine, Norway spruce and European fir from Finland and France and their prediction for the comparison of wood quality.** Paperi ja Puu Paper and Timber Vol. 84/No5/22002.

Vignote, S., Jiménez, F.J.; (1996) **Tecnología de la madera**. Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, 602 pp.

Walker, I.T.G.; Norton, B.; Lavery, D.J.; Chapman, M.J. (2005). **Screw ingress torque as a non-destructive determinant of timber compressive strength**. Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Hannover, 2 – 4 May 2005. Published by Shaker Verlag, Germany. P. 147 - 155.

Wang, X.; Wacker, J.P.; Morison, A.M.; Forsman, J.W.; Erikson, J.R.; Ross, R.J. (2005a). **Nondestructive assessment of single-span timber bridges using a vibration-based method**. USDA Forest Service, Research Paper FPL-RP-627. Forest Products Laboratory. June 2005. 17 p.

Wang, X.; Wacker, J.P.; Ross, R.J.; Brashaw, B.K.; Vatalaro, R. (2005b). **Development of flexural vibration inspection techniques to rapidly assess the structural health of timber bridges systems**. Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Hannover, 2 - 4 May 2005. Published by Shaker Verlag, Germany. P. 113 - 121.

Weaver, W.; Timoshenko S.P.; Young, D.H. (1990). **Vibration problems in engineering**. John Wiley & Sons Limited. 5th Edition. 610 p.

Weibull, W. (1939). **A statistical theory of the strength of materials**. Royal Swedish Institute for Engineering Research. Proceedings nº 151. 45 p.

Wilcox, W.W. y Pong, W.Y., 1971. **The effects of height, radial position and wetwood on white fir wood properties**. Wood and Timber 3(1): 47-55.

Wood, L.W. (1951). **Relation of strength of wood to duration of load**. USDA Forest Service, Report. FPL-R-1916. Forest Products Laboratory. December 1951. 10 p.

Ziethén, R. (2006). **The reliability of Proof-loading as a strength grading technique**. Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering. Portland, Oregon, USA. 6 - 10 August 2006. 8 p.

Ziethén, R. (2006). **Strength grading of Norway spruce using image analysis technique**. Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering. Portland, Oregon, USA. 6 - 10 August 2006. 8 p.

Normativa

ASTM D 143-94: 2000. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber.

ASTM D 198-02: 2003. Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes.

ASTM D 1990-00: 2002. Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Visually-Graded Dimension Lumber from In-Grade Tests of Full-Size Specimens.

ASTM D 245-00: 2002. Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber.

ASTM D 2915-03: 2003 Standard Practice for Evaluating Allowable Properties for Grades of Structural Lumber.

ASTM D 6874-03: 2003. Standard Test Methods for Nondestructive Evaluation of Wood-Based Flexural Members Using Transverse Vibration.

ASTM D 9-87: 1999. Standard Terminology Relating to Wood.

BS 4978: 1996. Specification for visual strength grading of softwood. (Clasificación visual de la madera aserrada de coníferas. -Gran Bretaña-).

Código Técnico de la Edificación. Ministerio de la Vivienda. Marzo 2006.

DIN 4074-1: 2003. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 1 : Nadelschnittholz. (Clasificación de la madera según su capacidad resistente. Parte 1: Coníferas. -Alemania-).

Directiva 89/106/CE de productos de construcción. 1989.

DS 483: 1999. Visuel styrkesortering af konstruktionstræ. (Clasificación visual de madera aserrada para construcción. -Dinamarca-).

Eurocódigo 5. Normativa de acompañamiento de normas europeas EN.

IS 127: 2002. Structural timber - visual strength grading - sawn softwoods with rectangular cross-section. (Madera aserrada estructural - clasificación visual resistente - madera de coníferas con sección rectangular. -Irlanda-).

ISO 8375: 1985. Solid timber in structural sizes. Determination of some physical and mechanical properties.

Ley de Ordenación de la Edificación: 1999. LOE. Ley 38/1999 de 5 de noviembre, de Ordenación en la edificación.

Marca de Garantía Pino Soria Burgos.

<http://www.pinosoriaburgos.com/index.php?men=40>

Método KAR (Knot Area Radio). Boletín de la madera europeo, vol. XXXIV; suplemento 16. Ginebra, Noviembre 1982

NF B 52001: 1998. Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés français résineux et feuillus. (Clasificación visual de la madera aserrada de coníferas y frondosas para uso estructural. -Francia-)

NLGA Standard Grading Rules for Canadian Lumber: 2004. (Normas de clasificación de madera aserrada estructural canadiense. -Canadá-).

NP 4305: 1995. Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual. (Madera aserrada de pino pinaster para estructuras. Clasificación visual. - Portugal-).

NS-INSTA 142: 1997. Nordiske regler for visuell styrkesortering av trelast. (Reglas nórdicas de clasificación visual de madera aserrada. -Países Nórdicos-).

NZ S 3631: 1989. Norma de clasificación visual de Nueva Zelanda

PS 20-05: 2005. American Softwood Lumber Standard.

Reglamento Europeo de Productos de Construcción (UE) nº 305/2011. 2011

UNE 56537: 1979. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la flexión estática.

UNE 56544: 2003. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

UNE-EN 13183-1: 2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.

UNE-EN 13183-2: 2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.

UNE-EN 14081-1: 2006. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales.

UNE-EN 14081-2: 2005. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por resistencia. Parte 2: Aparato de clasificación.

Especificaciones adicionales para el ensayo de tipo inicial.

UNE-EN 14081-3: 2005. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por resistencia. Parte 3: Equipo de clasificación. Especificaciones adicionales para el control de la producción en fábrica.

UNE-EN 14081-4: 2005. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por resistencia. Parte 4: Equipo de clasificación. Equipo de clasificación con sistema controlado automáticamente.

UNE-EN 1310: 1997. Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades.

UNE-EN 1611-1: 2000. Madera aserrada. Clasificación por el aspecto de la madera de coníferas. Parte 1: Piceas, abetos, pinos, abeto de Douglas y alerces europeos.

UNE-EN 1912: 2005. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.

UNE-EN 1995-1-1: 2006. Eurocódigo 5. Proyecto de Estructuras de Madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación.

UNE-EN 1995-1-1: 2006. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.

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

UNE-EN 338: 2003. Madera aserrada estructural. Clases resistentes.

UNE-EN 384: 2004. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

UNE-EN 408: 2004. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

UNE-EN 975-1: 1996. Madera aserrada de frondosas. Clasificación por aspecto. Parte 1: Haya y roble.

UNE-EN 975-2: 2006. Madera aserrada de frondosas. Clasificación por aspecto. Parte 2: Chopos.

UNE-ENV 1995-1-2: 1999. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.

Sitios web

American National Standards Institute (ANSI): <http://www.ansi.org>

American Wood Council: <http://www.awc.org>

AITIM: <http://www.infomadera.net>

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): <http://www.aenor.es>

ASTM Internacional: <http://www.astm.org>

Canada Standards Council of Canada (SCC): <http://www.scc.ca>

Canadian Wood Council: <http://www.cwc.ca>

CBS-CBT (NDT Systems): <http://www.cbs-cbt.com>

Denmark Dansk Standard (DS): <http://www.ds.dk>

Department of Wood Science, University of British Columbia: <http://wood.ubc.ca>

Dynagrade (NDT Systems): <http://www.dynagrade.com>

Entidad Nacional de Acreditación (ENAC): <http://www.enac.es>

EUFORGEN. <http://www.euforgen.org>

European Committee for Standardization (CEN): <http://www.cenorm.be>

FAKOPP Enterprise Bt.: <http://www.fakopp.com>

Fibre-Gen (NDT Systems): <http://www.fibre-gen.com>

Finland Finnish Standards Association (SFS): <http://www.sfs.fi>

France Association française de normalisation (AFNOR): <http://www.afnor.fr>

Germany Deutsches Institut für Normung (DIN): <http://www.din.de>

- Greece Hellenic Organization for Standardization (ELOT): <http://www.elot.gr>
- Historic Wood Structures Community: <http://qp.ntht.org/historicwoodstructures>
- Iceland Icelandic Council for Standardization (STRI): <http://www.stri.is>
- Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias: <http://www.inia.es>
- International Organization for Standardization (ISO): <http://www.iso.org>
- Ireland National Standards Authority of Ireland (NSAI): <http://www.nasai.ir>
- Italy Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI): <http://www.unicei.it>
- James Instruments Inc. (NDT Systems): <http://www.ndtjames.com>
- Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM: <http://www.hb.bv.tum.de>
- Maderas Ayuntamiento de Cuenca, S.A.: <http://www.maderascuenca.com>
- Maderas El Espinar, S.A.: <http://www.maderaselespinar.com>
- Maderas Jimeno: www.maderasjimeno.com
- Maderas Safont Pedarrós S.A.: www.maderassafont.com
- Maderas Sebastià: www.sebastia.es
- Magrama. http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/map_Abies_alba_tcm7-285901.jpg
- Magrama. http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desc_Abies_alba_descrip_regiones_tcm7-285843.pdf
- Marca de Garantía Pino Soria Burgos: www.pinosoriaburgos.com
- Metriguard Inc. (Precision Testing Equipment for Wood): <http://www.metriguard.com>
- Microtec (NDT Systems): <http://www.microtec.org>
- Monografías: <http://www.monografias.com/trabajos48/maderas/maderas2.shtml>
- NDT of Wood Laboratory, University of Western Hungary: <http://woodndt.nyme.hu>
- Nippon Avionics Co. (NDT Systems): <http://www.avio.co.jp>
- Norway Norges Standardiseringsforbund (NFS): <http://www.standard.no>
- Portugal Instituto Português da Qualidade (IPQ): <http://www.ipq.pt>
- Proceq (NDT Systems): <http://www.proceq.com>
- Serrería Sanz Hermanos: www.sanzhermanos.com
- Sweden Standardiseringsen i Sverige (SIS): <http://www.sis.se>

The American Society for Nondestructive Testing: <http://www.asnt.org>

The e-Journal of Nondestructive Testing: <http://www.ndt.net>

United Kingdom British Standards Institution (BSI): <http://www.bsi.org.uk>

Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Selva_de_Irati

Anexo 1

Resultados de ensayos

Los valores se presentan ya corregidos de acuerdo a UNE-EN 384.

Las unidades empleadas son las siguientes:

Tensión de rotura: N/mm²

Módulo de elasticidad longitudinal: N/mm²

Densidad: kg/m³

Grupo A

PROBETA	TENSIÓN DE ROTURA CORREGIDA	MÓDULO DE ELASTICIDAD CORREGIDO	DENSIDAD CORREGIDA
1	34,1851	13338,8128	393,0272
2	43,2320	28337,2212	385,8900
3	33,1795	9631,45628	455,0123
4	52,7657	7693,1614	480,8762
5	30,4420	8456,02371	487,3493
6	57,4243	13172,2219	421,4549
7	44,0445	10258,5061	401,0759
8	13,7934	7449,70723	390,9583
9	47,9989	9058,58113	474,7331
10	25,4139	6028,31519	391,9146
11	25,4139	7963,31306	441,4471
12	26,4754	6983,86203	396,8965
13	45,4529	12877,0946	436,6213
14	43,7737	8076,48341	434,2626
15	22,2853	14529,6332	387,5562
16	28,0956	4900,30835	365,0040
17	61,8924	19589,0886	468,2984
18	29,3246	7700,12909	369,3295
19	26,6430	9350,6872	382,3761
20	34,4086	18724,2847	379,1124
21	41,3362	10667,8401	448,8447
22	40,9451	10669,7411	395,1837
23	33,6823	9708,13909	427,6364
24	29,8833	7145,40422	466,8489
25	52,7686	13915,226	451,0232
26	59,1930	12223,9601	530,1255
27	46,1571	15182,8572	412,8802
28	30,8889	18946,7363	430,9405
29	29,3246	6356,75442	398,1584
30	51,0323	8937,69099	480,1203
31	35,9170	9570,65719	499,8092
32	24,6876	3852,97083	459,3576
33	36,4757	5933,51928	379,2771
34	26,6430	12271,8737	385,5952
35	65,9415	15301,4636	508,2190

36	72,9598	17487,4234	478,7144
37	68,3169	22329,7645	515,3409
38	64,5378	15743,996	450,9926
39	48,5505	24565,6032	446,0722
40	61,2446	12810,21	493,1038
41	68,6408	11605,428	515,9172
42	57,5444	13717,7086	484,4969
43	59,4090	16248,8089	491,2962
44	56,4937	16004,5408	498,6735
45	72,1500	22324,5623	551,1011
46	76,9009	24335,3338	571,8770
47	67,5611	26220,3472	524,0720
48	49,4716	20559,2521	507,8238
49	76,2530	31356,4764	554,8917
50	13,9610	22585,74	415,4976
51	45,8957	20404,89	417,3007
52	40,8569	20344,7253	440,6292
53	53,3084	20669,9743	408,9016
54	46,4916	17882,4704	417,2702
55	44,1619	15741,4707	416,2944
56	38,0959	13263,8316	405,0044
57	56,1158	21487,0348	419,9932
58	34,2410	12571,2609	423,2679
59	38,3194	8918,83866	492,3105
60	39,8193	9756,18101	465,0653
61	41,1194	19108,15	425,7954
62	31,5594	11387,4046	437,9115
63	28,2632	14149,4398	412,0048
64	28,2632	7293,10297	440,1673
65	21,8384	6295,04742	431,4204
66	19,1567	10733,9326	434,5202
67	58,5992	15550,6731	449,2081
68	41,2245	28733,6957	539,6740
69	21,4473	22104,0199	425,8261
70	36,3081	16664,0155	421,1824
71	35,3584	16958,0049	433,3888
72	55,4139	17709,7365	406,3209
73	35,4701	10303,5948	469,2472
74	47,6294	24696,102	425,2802
75	36,8109	19123,8117	465,2244
76	32,3974	18659,1285	485,4843
77	40,2067	22961,2527	419,4316
78	42,1572	17398,8876	386,3857
79	47,1960	18315,1259	392,7720
80	34,2410	15348,6339	442,7658
81	41,8321	14787,5803	463,9432
82	46,5458	20506,3036	464,5942
83	45,1913	15431,8022	452,9332
84	36,3081	25231,0559	462,5503
85	52,1264	15661,261	448,1246
86	32,9002	15550,9454	398,4413
87	36,8668	17281,1742	457,3138
88	43,3492	18546,7555	506,8993

89	41,6696	19265,4941	472,7560
90	33,9617	14195,5694	468,8456
91	49,0923	14983,941	490,2860
92	37,1461	12816,8772	426,9511
93	43,5659	10430,3347	477,5018
94	55,6299	13343,895	487,8816
95	22,8999	9759,53443	505,6250
96	51,0950	12499,6835	492,5859
97	30,4420	9686,28607	489,5123
98	38,0937	17948,2838	406,6687
99	41,1278	14731,6406	457,6545
100	41,9405	13626,1939	442,1464
101	48,5505	12110,8208	391,8823
102	31,1124	11207,7826	414,7294
103	21,0004	12772,1917	397,1575
104	42,7532	5695,81156	405,7236
105	19,3802	7786,42124	405,9506
106	44,4328	12801,4451	418,1537
107	50,2851	12614,3717	455,5024
108	29,1012	11767,1832	403,7866
109	41,3362	11339,5555	409,2988
110	38,0959	8233,35611	404,6991
111	41,3987	15329,4003	431,2749
112	35,4701	10046,1034	419,0364
113	48,2796	13878,3112	389,9936
114	50,2851	9511,18591	437,9748
115	44,9746	11274,337	400,1300
116	30,0509	14104,1018	426,9209
117	35,7494	11094,1202	419,5214
118	48,1170	14797,4097	412,1711
119	53,8483	21093,0244	487,6891
120	33,1237	10661,5128	438,6119
121	44,8120	9004,86122	428,2443
122	50,8250	20120,9374	485,7832
123	20,7769	10683,2529	387,9124
124	56,2237	15209,2725	433,4884
125	62,1623	16319,2917	399,0545
126	44,9746	16955,9975	471,1587
127	41,2903	27045,7134	408,2256
128	56,9796	15898,7943	423,9233
129	27,9838	7744,60191	435,9493
130	35,0790	9985,21065	400,4057
131	38,2562	11709,3952	465,7033
132	47,3585	13096,6729	439,1597

Grupo B

PROBETA	TENSIÓN DE ROTURA CORREGIDA	MÓDULO DE ELASTICIDAD CORREGIDO	DENSIDAD CORREGIDA
1	35,4972	8139,1946	374,3334
2	50,4854	9640,7308	394,0279
3	51,4943	9858,3531	412,8411
4	48,1816	7424,0152	400,1039
5	59,5979	10647,3761	418,5079
6	51,3373	11085,3156	407,3671
7	54,2337	10356,2016	430,7170
8	37,5981	9091,5786	422,4388
9	40,6560	7318,4855	418,0659
10	54,1175	9143,5261	434,1519
11	52,8051	9509,3053	423,0944
12	61,7295	10813,1932	416,1556
13	54,4554	10675,5162	431,0693
14	45,1457	11545,3899	429,2584
15	33,0352	7674,5816	416,7330
16	51,3353	10802,3916	432,7534
17	58,5482	8539,0386	424,8367
18	26,9326	9223,3604	433,5959
19	35,5272	10201,3367	431,4703
20	53,7133	8638,9125	413,8796
21	61,2033	9532,0776	435,3953
22	29,4516	7369,9317	435,2810
23	56,1577	10195,2655	433,3463
24	29,1739	9258,1263	429,5601
25	50,5398	9028,9649	444,2573
26	41,9658	9931,1077	431,9478
27	55,0770	10667,5232	432,1893
28	47,1284	9555,5862	440,2253
29	40,8512	9135,9481	439,0509
30	31,3839	10713,7983	438,2185
31	59,8567	9000,7051	467,5921
32	42,4355	9798,5708	430,7219
33	26,0023	6578,7402	462,9432
34	40,8549	9432,4744	431,2328
35	53,6115	10215,7498	436,0772
36	52,5334	9620,5143	437,9624
37	51,0345	9422,8156	439,9744
38	40,9155	9721,5765	434,1800
39	58,3094	10998,8445	446,1984
40	64,3574	11892,1880	457,1305
41	52,1122	10769,1601	446,6053
42	55,5971	10894,2087	442,2522
43	25,6503	7830,2225	462,7383
44	40,1818	7972,5271	444,6112
45	52,9431	9714,2258	447,4798
46	38,8752	9635,7412	451,7864
47	53,7773	9756,9779	451,9748
48	38,6853	8389,1216	447,7459

49	43,4706	10314,7952	452,1677
50	47,6921	10414,8970	454,2658
51	25,5782	8111,2471	454,7973
52	52,1019	9734,7798	456,4643
53	42,0104	9462,4101	455,1776
54	39,0825	9285,9197	452,2696
55	48,6154	9191,4971	446,4779
56	37,5258	10243,2291	450,5858
57	36,8633	8981,5269	450,3739
58	46,6690	10782,4733	453,9685
59	56,9734	10995,8913	462,6827
60	27,4249	7908,1628	476,7534
61	45,3961	9055,7363	465,6590
62	51,8012	11706,8941	474,1180
63	32,5657	8492,6641	465,5522
64	48,8895	10578,1466	450,1621
65	32,0359	8232,6838	470,0349
66	54,5887	12180,6145	465,1064
67	39,0180	9849,3840	459,4882
68	42,1930	9444,8874	474,1305
69	66,8271	12415,5198	470,8338
70	63,4286	10942,4799	491,3643
71	35,3711	9121,8180	482,4962
72	38,0043	9568,5811	477,7450
73	32,6858	9531,0688	487,5969
74	67,4458	11628,9817	494,8851
75	35,7629	8955,5733	489,8648
76	52,2155	10558,2804	502,2652
77	47,1574	8846,4031	518,5572
78	41,7782	9583,2723	507,3861
79	71,5033	11254,4386	500,2812
80	47,3745	8671,5274	508,5145
81	54,1595	11124,4796	519,9829

Grupo C. Subgrupo/Lote C.1

PROBETA	TENSIÓN DE ROTURA CORREGIDA	MÓDULO DE ELASTICIDAD CORREGIDO	DENSIDAD CORREGIDA
1	16,8152	10092,5584	417,4629
2	22,0914	13092,8134	507,8100
3	28,1188	13213,7278	451,0756
4	28,4440	9124,0502	391,2105
5	30,0756	11725,1972	435,9307
6	31,3286	14513,4187	458,0155
7	34,1586	11236,7328	438,4605
8	34,2850	10158,0005	415,5870
9	34,8992	9762,4813	393,4925
10	35,8754	12459,7640	472,5949
11	36,4475	12818,2084	492,4879
12	37,3725	8783,5843	435,8366
13	38,1426	15254,8667	443,5944
14	38,4114	10138,9899	380,4157
15	39,7618	12920,6476	457,7498
16	41,6122	15467,4740	381,3005
17	42,1027	12168,7313	475,8698
18	42,2357	14579,3530	496,4953
19	42,7537	12879,9113	401,9755
20	43,1679	14666,4535	484,4492
21	43,2533	7637,2077	441,9806
22	43,6200	12602,9005	421,1399
23	44,1915	12599,0294	397,4036
24	44,2558	12336,7595	453,4168
25	44,3789	15099,6442	458,7892
26	46,2250	17729,8288	440,3633
27	46,3769	18892,3429	450,2749
28	46,6206	11563,4629	412,1449
29	46,7085	13013,5578	424,7393
30	47,3031	9517,8438	381,2501
31	47,6241	13649,7634	417,7928
32	47,9214	13048,5081	439,4539
33	48,4210	16598,9011	448,2249
34	50,2054	15054,5520	408,0751
35	50,4798	13407,9659	433,6110
36	50,5817	22609,1534	450,4669
37	50,9165	18741,2222	429,8174
38	50,9698	7257,2461	433,8192
39	53,0773	6073,6216	421,1162
40	54,6876	14613,2889	439,8613
41	56,4290	14862,4942	467,8554
42	56,9129	14398,3175	421,5700
43	57,0017	18941,0669	448,5882
44	58,5140	14285,8592	484,4867
45	58,9918	13143,3074	460,1483
46	62,0165	34973,6291	437,4202
47	65,1297	15288,2630	436,0334

Grupo C. Subgrupo/Lote C.2

PROBETA	TENSIÓN DE ROTURA CORREGIDA	MÓDULO DE ELASTICIDAD CORREGIDO	DENSIDAD CORREGIDA
1	17,2899	7126,4085	503,6996
2	17,4047	5535,3624	525,0296
3	20,5541	8417,0997	392,7238
4	22,3828	9603,2361	498,5303
5	22,4284	11700,8225	409,2249
6	22,5901	9354,4559	403,4260
7	22,9427	7929,4952	455,7004
8	23,2592	8902,6356	410,3316
9	24,5235	7393,6630	442,1083
10	25,9433	10484,7205	449,5917
11	26,1058	10463,8443	397,7743
12	27,1554	12243,5979	445,5059
13	28,0273	9825,4339	422,9767
14	28,8758	9468,4500	448,8642
15	29,2174	8932,5706	402,0632
16	30,0936	9120,5992	401,0509
17	31,4690	7637,6624	426,1465
18	31,5269	7596,5217	417,5420
19	31,9412	10993,4252	397,1877
20	32,7082	12710,1402	400,4985
21	34,1720	12630,1078	395,1896
22	35,5670	11394,3794	471,7123
23	36,2916	13559,0491	451,9278
24	36,3248	14789,1792	426,8282
25	36,6452	12229,7729	476,1049
26	36,7399	12432,8552	426,8047
27	37,0187	12696,7148	506,8067
28	37,0609	11379,9220	401,0272
29	37,5136	11298,9375	435,7352
30	38,1849	12109,2073	455,1914
31	38,7506	14029,4118	436,6672
32	38,9920	10674,1836	432,1867
33	40,4522	14254,6218	445,1666
34	42,1842	13005,2466	436,9176
35	42,4799	13093,3041	482,4446
36	43,5441	12607,4348	457,3079
37	43,5927	12136,7332	413,4031
38	43,8914	12268,4723	392,2136
39	46,0110	14761,0920	429,5486
40	47,9059	11777,7778	424,0547
41	49,2487	19422,3602	446,8534
42	51,8535	14080,4639	437,0660
43	53,4696	15315,8802	417,2059
44	53,5161	12364,7584	403,2752
45	54,1262	11901,4353	402,3564
46	55,3505	15148,6355	419,8560
47	64,9789	17150,6683	444,7716

Grupo C. Subgrupo/Lote C.3

PROBETA	TENSIÓN DE ROTURA CORREGIDA	MÓDULO DE ELASTICIDAD CORREGIDO	DENSIDAD CORREGIDA
1	12,2965	9195,4140	408,8143
2	19,9790	10321,4749	410,2745
3	22,6917	8811,5764	436,4295
4	23,4656	13333,3992	409,5524
5	23,6236	9779,0954	414,4445
6	27,0731	9654,8706	461,0661
7	29,7206	14605,7848	483,0736
8	29,7466	10449,8550	420,5879
9	30,0974	9534,5610	367,4428
10	30,3824	8103,5900	506,4874
11	30,5195	9890,1786	393,3630
12	30,6601	11742,2513	461,6420
13	31,6243	12849,7959	424,8345
14	32,8247	9731,1851	405,1730
15	33,1085	13161,3112	433,0394
16	33,4182	14911,1071	367,0996
17	33,4496	12314,0614	431,4495
18	33,9848	12204,0452	416,2516
19	34,2990	12154,8262	378,2952
20	34,3153	10565,3393	467,3353
21	34,3848	13177,2497	401,5885
22	34,6364	14069,6368	447,2638
23	36,0084	11462,5379	404,6338
24	36,2321	13375,2082	433,8216
25	37,8606	12707,3339	416,9283
26	38,5316	11032,1231	462,0973
27	38,5677	15036,1262	405,0022
28	39,6484	14936,3777	410,4566
29	39,9351	15889,6516	479,6869
30	40,5598	14790,7539	477,3494
31	40,9415	15129,9687	406,8615
32	41,0883	10971,8951	459,5212
33	41,7780	12667,9937	357,2466
34	42,0679	11800,8053	398,6421
35	43,4486	14336,1605	399,2667
36	43,6011	11487,2160	431,8519
37	44,3749	13658,2005	433,6172
38	46,0570	13923,4828	397,0791
39	46,4406	11811,4582	391,6467
40	47,4330	12400,7955	406,7389
41	48,5613	12726,0227	437,0136
42	49,1664	10804,7590	520,7615
43	44,0026	14567,5770	425,6329
44	57,0672	15139,6071	399,2109

Anexo 2

Normas nacionales en Europa para la clasificación visual del abeto blanco

País	Norma
Austria	Austrian Standard OENORM DIN 4074 Teil 1. Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit, Nadelschnittholz.
R. Checa	Czech Standard CSN 73 2824-1 idt DIN 4074-1 Trídení dřeva podle penosti. Cást 1: Jehlicnaté rezivo idt DIN 4074-1
Francia	French Standard NF B 52-001. Règles d'utilisation du bois dans les constructions; Classement visuel pour emploi en structure pour les principales essences résineuses et feuillues
Alemania	German Standard DIN 4074 Teil 1. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit, Nadelschnittholz.
Países Bajos	Netherlands Standard NEN 5480. Kwaliteitseisen voor hout (KVH 1980) - Houtsoort azobé
Países Nórdicos	Nordic grading rules – INSTA 142. Nordic visual strength grading rules for timber
Italia	Italienische Norm UNI 11035-1/-2. Legno strutturale – Classificazione a vista di legnami italiani secondo la resistenza meccanica
Eslovenia	SIST DIN 4074-1. Razvrscanje lesa po trdnosti -1 del Zagani les iglavcev
Reino Unido	British Standard BS 4978. Visual strength grading of softwood