

2016

Puesta a punto de la técnica
HOLE DRILLING
en el análisis estructural in situ de

Maite Crespo de Antonio

Tesis Doctoral dirigida por Santiago Sánchez Beitia

Agradecimientos

Son muchas las personas que por una u otra razón vienen a mi mente a la hora de escribir estas líneas. Seguramente por ser éste un camino largo, un proceso o una evolución, las personas como las ideas y la motivación vienen y van. Cada persona que ha compartido conmigo un instante en este tiempo dedicado a la investigación ha aportado un granito de arena a mi persona, a mi manera de pensar, y seguro está reflejado en este trabajo.

Quiero mostrar mi agradecimiento especialmente al director de esta Tesis Doctoral, al Dr. Santiago Sánchez-Beitia, a Santi, por la oportunidad que me brindó en su día y la confianza que depositó en mí al ofrecerme trabajar con él en este bonito proyecto. Por guiarme y acompañarme durante todo el proceso y por darme luz cuando la he necesitado.

Al Dr. Luis Acuña Rello por su generosidad, que además de enseñarme profesionalmente durante mi estancia en Palencia todo lo que sabe, por acogerme como a una amiga y regalarme momentos que no olvidaré. Agradecer también al resto del grupo de investigación en Estructuras y Tecnología de la Madera de la Universidad de Valladolid, y en especial a Alfonso Basterra.

Al Proyecto de Investigación PES11/32, porque sin financiación el mundo de la investigación resulta muy hostil. Al Grupo de Investigación ESMAARQ (GIU15/11) de la UPV/EHU, que surge en el momento perfecto, haciendo que esta Tesis Doctoral sea mi carta de presentación para formar parte del equipo y seguir trabajando en el mundo de las estructuras de madera.

Al Máster de Restauración y Gestión Integral del Patrimonio Construido de la UPV/EHU, al que sigo sintiéndome muy vinculada, que me abrió un mundo y me ayudó a encontrar una dirección en la que seguir caminando en el mundo de la Arquitectura.

A mi familia y a mis amigas y amigos, por estar siempre donde tienen que estar, dando apoyo incondicional y un cariño infinito.

A loar Cabodevilla, feliz de haberle conocido en el camino, siempre dispuesta a ofrecer su ayuda en cualquier frente. Zu gabe tesi hau ez luke ez eduki ez itxura hau izango. Eskerrik asko bihotz-bihotzez. Egunen batean topatuko dut eskertzeko modua.

A Ainara Martínez de Albéniz, arquitecta apasionada por las estructuras de madera, por invitarme a caminar junto a ella en el periplo de la inspección de las estructuras de madera de las que tanto he aprendido y que tanto han aportado a este trabajo. Esker aunitz.

Finalmente, a mis compañeros doctorandos, ya amigos de la ETSASS/DAGET, siendo los que realmente entienden y viven en sus propias carnes lo que significa una Tesis Doctoral, y que sin ellos nada de esto habría sido lo mismo. Feliz y agradecida de haber compartido tantos ratitos con vosotros y de haber formado parte de un equipo, “entre todos un cerebro”. Eskerrik asko bihotzez Dani, Arri, Irati eta Itzi.





Puesta a punto de la técnica
HOLE DRILLING
en el análisis estructural in situ de
elementos portantes de madera

We may use wood with intelligence only if we understand wood

Frank Lloyd Wright, 1928

Resumen

Esta Tesis Doctoral pretende dar a conocer una nueva aplicación de la técnica Hole Drilling dentro de la evaluación in situ de las estructuras de madera. Con el fin de proteger el Patrimonio Construido, esta técnica proporciona un dato fundamental: El estado tensional real y actualizado de los elementos constructivos de madera. Conociendo el estado de tensiones existente en un determinado elemento y en un determinado momento, se puede comparar con su límite de rotura y, por tanto, determinar si el elemento puede continuar cumpliendo su función con seguridad.

La técnica de Hole Drilling consiste, básicamente, en eliminar parte del material estudiado mediante una perforación realizada con un taladro. Al eliminar el material, las tensiones existentes en el elemento estructural se relajan, dando lugar a unas deformaciones medibles en el perímetro del agujero. A su vez, esas deformaciones pueden relacionarse matemáticamente con el estado tensional inicial. Se trata de una técnica muy poco destructiva que aporta una información muy útil y valiosa para el técnico competente.

Esta técnica fue puesta a punto en el mundo del Patrimonio Construido para medir tensiones de origen estructural, hace algunos años, de la mano del director de esta Tesis Doctoral. En aquellos inicios, la técnica fue aplicada en estructuras emblemáticas construidas con piedra, midiendo las tensiones sobre elementos sometidos a compresión. Un bloque de piedra puede considerarse un material de comportamiento isotrópico, es decir que se comporta igual en todas las direcciones o que carece de alguna dirección predominante.

El presente trabajo es, de alguna manera, la continuación de esa investigación pionera. Sin embargo, la técnica ha tenido que ser adaptada tecnológicamente y matemáticamente para su aplicación en elementos de madera, un material con un comportamiento ortotrópico y complejo. La madera, por su propia naturaleza, define una clara direccionalidad en el sentido de las fibras o de crecimiento del árbol. Ese es un hecho que condiciona radicalmente la concepción de esta Tesis Doctoral.

Todos los ensayos en esta investigación se han realizado sobre madera de pinus radiata D. Don procedente del País Vasco. Se han llevado a cabo ensayos en dos laboratorios diferentes con el fin de determinar mediante la técnica Hole Drilling el comportamiento estructural de piezas de madera sometidas tanto a compresión y como a flexión.

Los resultados obtenidos en esta investigación son muy satisfactorios y han dado lugar a algunas publicaciones anteriores a esta Tesis Doctoral, que han servido para estructurar y dar continuidad a la misma. Sin embargo, este trabajo no ha hecho más que dar el primer paso en un nuevo camino de investigación. La madera es compleja, heterogénea, y existen diversos géneros y especies sobre las que investigar y un patrimonio sembrado de ejemplos dignos de ser estudiados. Finalmente, se prevé que los resultados obtenidos en este trabajo servirán para la normalización de la técnica y su posterior contribución a la conservación de las estructuras de madera.

Laburpena

Doktore-Tesi honen helburua Hole Drilling teknikaren aplikazio berri bat ezagutzera ematea da. Aplikazio berria zurezko egituren ebaluazioaren esparruan kokatzen da. Eraikitako ondarea zaintzeko xedearekin, teknika honek funtsezko datua eskaintzen du: Zurezko egitura-elementu baten egungo tentsio-egoera erreala zein den. Elementu batek une batean duen tentsio-egoera jakinda, posible da konparatzea bere haustura-mugarekin eta, beraz, bere funtzioa segurtasunez betetzen jarraitu dezakeen zehaztea.

Hole Drilling teknika, laburki, aztertutako materialaren parte bat taladro bidez kentzean datza. Materiala kentzean egitura elementuaren barne tentsioak erlaxatzen dira eta ondorioz, zuloaren inguruan neurgarriak diren deformazioak gertatzen dira. Aldi berean, deformazio horiek aurretik zuen tentsio-egoerarekin erlazionatu daitezke matematikoki. Teknika erdi-suntsitzailea da eta oso informazio erabilgarria ematen dio teknikari konpetenteari egiturari kalte txiki eta puntuala eraginez.

Teknika hau ondarearen munduan eta egitura-tentsioak neurtzeko moldaketa, duela urte batzuk Doktore-Tesi honen zuzendariak egin zituen. Lehenengo ariketa horiek Eraikitako Ondarearen eredu enblematikoetan egin ziren, beti ere harrizko edo fabrikazko egituretan eta konpresiopean lan egiten zuten elementu jarraietan. Harria eta fabrikaren portaerak isotropikoak dira, hau da, norabide guztietan berdin jokatzen dutenak edo norabide nagusi bat ez dutenak.

Burututako lana aitzindaria izan zen ikerketa baten jarraipena da. Hala ere, teknika hau moldatua izan da teknologia eta matematikaren aldetik zurezko elementuetan aplikatu ahal izateko, zurak izaera ortotropiko konplexua baitu. Hots, egurrak, izatez, oso markatuta dauka norabide printzipal bat, zuntzekiko paraleloa dena. Hori Doktore-Tesi honen sorrera guztiz baldintzatzen duen ezaugarria da.

Ikerketa honetan burututako entsegu guztiak EAEko pinu radiata D. Don espeziean egin dira. Bi laborategi desberdinetan egin dira entseguak. Batetik, konpresiopekoak Donostian eta bestetik, flexiopekoak Palentzian. Entsegu horien helburua zurezko egitura-elementuen portaera definitzea da, zehazki, Hole Drilling teknikaren bitartez.

Lortutako emaitzak oso onak dira eta, bidean, argitalpen batzuk egiteko aukera eman dute. Argitalpen horiek Tesia egituratzeko eta jarraitasuna emateko ere balio izan dute. Lan honek, hala ere, ikerketa-bide berri bat baino ez du ireki. Zura konplexua da, heterogeneoa, eta genero eta espezie aunitz existitzen dira, denak ikergarriak. Azkenik, lan honetan lortutako emaitzek Hole Drilling teknika normalizatzeko balio izatea opa dut eta, ondorioz, zurezko egitura historikoen kontserbazioan laguntzea.

Abstract

The aim of this PhD is to present a new application of the technique already known as Hole Drilling within timber structures assessment. In order to preserve the built heritage, this technique provides important information: The real and updated stress state of timber structural elements. If real stress state is known it can be compared with its resistance limit and, therefore, determine whether it is able to continue playing its role safely.

Hole Drilling technique consists, briefly, in removing a part of the material through a hole made with a drill. When a part of the material is removed, the internal stresses in the structural element are relieved, leading to some measurable strains around the hole. Those strains are mathematically related with the previous stress state. It can be considered a minor destructive technique as the damage caused is very located, and the given information is very useful for the competent technician.

The technique was developed for its application in heritage elements by the director of this PhD some years ago in order to analyze stresses resulting from load-bearing. Those first applications were performed in emblematic constructions of the built heritage, where structures were made of stone or brick and stresses were only measured in elements bearing compressive stress. Stone and brick can be considered isotropic materials, what means that their behavior is always the same in every direction or that there is no predominant direction.

This document is, somehow, the continuation of that previous research. However, the technique had to be adapted technologically and mathematically for its application on timber elements. Wood is an orthotropic complex material. This means, that wood defines a clear stronger direction parallel to the fibers. This feature thoroughly affects the conception of this research project.

Every test carried out during this research was made on *pinus radiata* D. Don samples, taken from the Basque Country. The tests took place in two different laboratories, in order to determine the structural behavior of timber elements subjected to compression (in one laboratory) and to bending (in other laboratory), specifically by applying the Hole Drilling technique.

The results obtained from this research are very satisfactory and have led to some publications during the PhD process, which have helped to structure and to continue this final document. However, this work has just open a new way of application of the technique. Wood is complex, heterogeneous, and there are several genera and species to study and a seed worthy heritage buildings to be analyzed. Finally, it is expected that the results shown in this PhD will serve for the standarization of the technique and its successive contribution to the conservation of timber structures in heritage buildings.

Índice

| | |
|--|-----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 2 |
| 1.1 Contexto..... | 2 |
| 1.2 Justificación de la investigación | 4 |
| 2. OBJETIVOS | 6 |
| 2.1 Objetivos Generales | 6 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 7 |
| 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL | 9 |
| 3.1 Material de ensayo | 9 |
| 3.2 Desarrollo experimental | 9 |
| 4. LA MADERA | 12 |
| 4.1 La madera como material | 12 |
| 4.1.1 Estructura interna de la madera | 15 |
| 4.1.2 La madera como material sostenible | 26 |
| 4.1.3 La especie objeto de estudio: <i>Pinus radiata</i> D. Don | 32 |
| 4.2 La madera en la arquitectura | 39 |
| 4.2.1 La madera en la historia de la construcción | 39 |
| 4.2.2 La madera estructural y sus particularidades | 49 |
| 4.2.3 Propiedades elástico-mecánicas de la madera | 51 |
| 4.2.4 Normativa y regulación de las estructuras de madera..... | 56 |
| 4.3 Teorías de restauración y conservación de las estructuras de madera | 71 |
| 5. ESTADO DEL ARTE | 78 |
| 5.1 Técnicas de caracterización de elementos de madera in situ | 78 |
| 5.1.1 Técnicas de evaluación in situ no-destructivas (NDT) | 82 |
| 5.1.2 Técnicas de evaluación in situ quasi no-destructivas (MDT) | 98 |
| 5.2 Técnicas de análisis estructural | 110 |
| 5.2.1 Gatos Planos (Flat Jacks) | 111 |
| 5.2.2 Hole Drilling | 117 |
| 6. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE LA TÉCNICA HOLE DRILLING EN ESTRUCTURAS DE MADERA | 128 |
| 6.1 Introducción | 128 |
| 6.2 Adaptación a la condición de ortotropía | 128 |
| 6.3 Adaptación a las tensiones estructurales | 132 |
| 6.4 Medios instrumentales y materiales | 134 |
| 6.5 Ensayos de obtención de datos | 137 |
| 6.5.1 Obtención de los módulos elásticos | 139 |
| 6.5.2 Obtención de la matriz de <i>compliance</i> | 140 |
| 6.5.3 Ensayos de comprobación de los datos obtenidos | 144 |

| | |
|--|-----|
| 7. ENSAYOS DE LABORATORIO Y RESULTADOS | 146 |
| 7.1 Fase I: Compresión | 146 |
| 7.1.1 Preparación del ensayo | 147 |
| 7.1.2 Resultados de los módulos elásticos | 150 |
| 7.1.3 Resultados de la matriz de <i>compliance</i> | 155 |
| 7.1.4 Ensayos de comprobación en el laboratorio | 161 |
| 7.1.5 Limitaciones de los ensayos de compresión | 163 |
| 7.2 Fase II: Flexión | 166 |
| 7.2.1 Preparación del ensayo | 170 |
| 7.2.2 Resultados de los módulos elásticos | 174 |
| 7.2.3 Resultados de la matriz de <i>compliance</i> | 180 |
| 7.2.4 Ensayos de comprobación en el laboratorio | 185 |
| 7.2.5 Limitaciones de los ensayos de flexo-tracción | 187 |
| 8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS | 189 |
| 8.1 Análisis geométrico de los ensayos | 189 |
| 8.2 Discusión de los resultados | 200 |
| 8.2.1 Fase I: Compresión | 200 |
| 8.2.2 Fase II: Flexión | 202 |
| 9. APLICACIÓN EN ESTRUCTURAS REALES | 204 |
| 9.1 Ejemplo I: Vivienda C/Ansoleaga de Pamplona (Navarra) | 205 |
| 9.2 Ejemplo II: Vivienda en Mezkiritz (Navarra) | 210 |
| 9.2.1 Ensayo en la Vigueta2 | 213 |
| 9.2.2 Ensayo en la Vigueta6 | 217 |
| 9.3 Ejemplo III: Vivienda en Tolosa (Gipuzkoa) | 221 |
| 9.4 Ejemplo IV: Vivienda en el Monte Ulía en Donostia-S. S. (Gipuzkoa) | 226 |
| 9.4.1 Ensayo en la Vigueta3 | 227 |
| 9.4.2 Ensayo en la Vigueta5 | 231 |
| 10. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS | 234 |
| 10.1 Conclusiones | 234 |
| 10.2 Publicaciones y comunicaciones originadas por esta Tesis Doctoral | 243 |
| 10.3 Líneas futuras | 245 |
| Referencias | 249 |
| Anexo 1 | 265 |
| Anexo 2 | 284 |

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

La evaluación estructural in situ engloba diversos métodos y técnicas útiles para analizar las características, la capacidad portante, estados de conservación y patologías o daños en las estructuras de los edificios existentes. Es en este ámbito donde se centra el contenido de esta Tesis Doctoral.

Que puedan aplicarse *in situ* (latinismo que significa en el lugar o en el sitio) dota a estas técnicas de una gran ventaja; que pueden aplicarse mediante equipos portátiles en el propio edificio objeto de estudio realizando las mediciones pertinentes allí mismo, evitando la extracción de muestras y posterior estudio en laboratorio. Por esta razón son técnicas inocuas o muy poco dañinas para la estructura. Esta es una premisa fundamental en el mundo de la conservación del patrimonio (se trata de conservar y no de estropear o destruir). Habitualmente se hablará de técnicas no destructivas, semidestructivas o poco destructivas. Internacionalmente, *Non-Destructive Techniques*, *Semidestructive Techniques* y *Minor Destructive Techniques* (Lombillo, Thomas et al. 2013, Kasal, Tannert 2011).

La evaluación in situ es fundamental para recolectar los datos necesarios para estimar tanto la integridad física como las propiedades elástico-mecánicas de un elemento estructural en servicio. Aun cobra mayor interés si esa estructura es el esqueleto portante de un edificio histórico, cuyo valor patrimonial es tal que merece ser conservado y transmitido a las generaciones venideras. Una buena evaluación estructural previa puede servir de guía y de motor para acometer un proyecto de intervención, conservación, restauración o rehabilitación y tomar las medidas necesarias concretas en cada caso. La restauración no es una ciencia exacta, hay que estudiar cada caso individualmente y barajar todas las posibilidades antes de actuar. Cuanta más sea la información técnica existente y mayor el conocimiento acerca del estado actual, más acertada será la decisión.

En la actualidad existen diversos métodos y técnicas para la evaluación in situ. Estas técnicas suelen ser de aplicación inmediata para determinar las

propiedades físico-mecánicas del material (densidades, módulos de elasticidad, etc.) o su estado de conservación (contenido humedad, pudriciones, falta de sección, oquedades, etc.). Cada día van surgiendo técnicas nuevas y evolucionando las existentes. Generalmente el proceso de diagnóstico de una estructura comienza con una inspección visual de reconocimiento del caso y continúa con mediciones cualitativas o cuantitativas mediante técnicas instrumentales. Todas las actividades se llevan a cabo con el fin de aportar un enfoque científico, material y directo al estudio del estado de la estructura en cuestión, y siempre con un mismo fin: causar un daño menor al elemento estudiado.

Sin embargo, ciñéndose a las estructuras de madera, no existe hasta el momento entre estas técnicas de aplicación in situ, ninguna capaz de dar a conocer el estado tensional de un determinado elemento estructural de madera sea cual sea su estado de conservación. Se entiende como elemento estructural cualquier parte conformante del conjunto de una estructura, que se rige según los principios de la construcción y de la resistencia de materiales. Las tensiones existentes en los elementos estructurales son consecuencia de su capacidad portante, es decir, de su función intrínseca de soportar cargas gravitatorias (pesos propios) y demás acciones externas (uso, mantenimiento, nieve, viento, etc.). Conocer el estado de tensiones real, el aquí y el ahora, de un elemento estructural de madera es el objetivo de la nueva aplicación de la técnica Hole Drilling que aquí se propone.

De una manera simplificada puede decirse que Hole Drilling es una técnica capaz de relacionar deformaciones de relajación tras realizar una pequeña perforación (en inglés *Hole Drilling*, que significa Agujero Taladrado) con las tensiones existentes en ese mismo material. La retirada de parte del material produce una relajación en el perímetro del agujero realizado, pudiendo ser medida mediante la técnica apropiada. Obtener esa información es de gran importancia para saber si hay necesidad de sustitución o para confirmar que un determinado elemento puede seguir cumpliendo su función estructural en condiciones de seguridad y evitar así la pérdida de elementos originales, de conjuntos estructurales históricos y de sistemas tradicionales de construcción. Esa información es muy valiosa para el técnico competente que tiene que acometer un proyecto de restauración o rehabilitación estructural.

Desde otro punto de vista, con la perspectiva de una nueva generación de construcciones en madera, la técnica de Hole Drilling puede ser útil no solo en el mundo de las estructuras históricas del patrimonio sino también en las del futuro. La realidad es que durante años, muchos elementos de madera han sido sustituidos en las estructuras históricas sin que hubiera una necesidad justificada y, en muchos casos además, han sido sustituidos por elementos de otros materiales (acero u hormigón, mayoritariamente). Usando como pretexto su vulnerabilidad ante incendios y ante los agentes xilófagos y las pudriciones la madera fue dejándose de lado, pero hoy en día tanto en las labores de

reparación y de sustitución de piezas históricas, como en las edificaciones de nueva planta la madera estructural está viviendo un nuevo auge.

En definitiva, esta Tesis Doctoral contiene una potente labor experimental, de trabajo en laboratorio, que ha permitido avanzar en la aplicación de la técnica de Hole Drilling sobre elementos de madera. La novedad radica sobre el material en el que se realizan los ensayos, por primera vez en elementos estructurales de madera, y en el ámbito en el que se va a aplicar, el Patrimonio Histórico Construido. Es de esperar que, en un futuro no tan lejano, esta técnica conocida en la comunidad científica pero con otras aplicaciones y en otros campos de conocimiento, forme parte de las técnicas habituales de caracterización estructural in situ.

1.2 Justificación de la investigación

Rara vez existe información técnica suficiente acerca de las estructuras históricas (planos estructurales, relación de los materiales utilizados, medición de sobrecargas, secciones constructivas detalladas, etc.) como para tomar decisiones con seguridad. Además frecuentemente, ya sea por el paso de tiempo, los cambios de usos o las distintas necesidades que van acaeciendo en la vida los edificios, éstos sufren numerosas alteraciones estructurales y es posible que la información técnica relacionada, si la hay, nada tenga que ver con la situación presente.

Conocer el estado actual real del estado de las tensiones en una estructura en servicio es fundamental por razones obvias. La técnica de Hole Drilling, conocida y utilizada habitualmente en ámbitos más tecnológicos y en otro tipo de materiales, puede suponer una gran aportación en la resolución de esa cuestión y un reto a nivel científico. No es una técnica totalmente inocua, pero la información que desentraña la retirada de una pequeña porción del material es incalculable: el estado de tensiones real y actualizado del elemento estructural en cuestión.

Este trabajo de investigación se justifica desde la necesidad inminente de realizar una profunda labor de investigación para aseverar que la técnica es apta y eficaz para ser utilizada sobre elementos estructurales de madera, material con una condición natural anisotrópica, utilizado de manera habitual en la historia de la construcción. La madera es compleja y sus comportamientos y propiedades pueden diferir de una especie a otra o incluso entre elementos portantes de una misma especie.

Para poner a punto la técnica, se propone la realización de varios ensayos en el laboratorio, donde las variables están controladas, para después poder llevar a cabo su aplicación en estructuras existentes del Patrimonio Arquitectónico.

Existen y se han ido desarrollando numerosas técnicas de evaluación in situ (Kasal, Tannert 2011) fundamentales para cuidar y proteger el patrimonio

arquitectónico que ha llegado a nuestros días y, definitivamente, la aplicación de nuevas tecnologías resulta de vital importancia para perfeccionar el proceso de diagnóstico, protección, conservación y restauración (Basterra, Casado et al. 2005). El método de Hole Drilling debe ser incluido entre esas técnicas y se debe fomentar y potenciar su uso entre los especialistas para facilitar la inspección, diagnóstico y la realización de proyectos de restauración, aportando rigor técnico a las inspecciones.

Capítulo 2

OBJETIVOS

La presente Tesis Doctoral sirve para dar a conocer una nueva aplicación de la técnica Hole Drilling, denominada así internacionalmente, sobre elementos estructurales de madera y en el ámbito de la restauración histórica. Bajo esta premisa se pueden clasificar los objetivos entre generales o más teóricos y objetivos concretos o específicos.

2.1 Objetivos Generales

A nivel teórico esta Tesis Doctoral fue motivada por varios objetivos, a partir de los cuales pudo distinguirse un camino a seguir.

a. Colaborar en la conservación del Patrimonio Histórico en madera

Las estructuras de madera forman parte de nuestro legado histórico, cultural y arquitectónico. En cualquier geografía existen numerosos ejemplos, algunos dignos de estudio, que sin duda merecen ser conservados. Sin embargo, el carácter orgánico del material, sus consecuentes deterioros y la falta de conocimiento general acerca del material, han dado como resultado la pérdida de muchos elementos estructurales de madera. Hoy en día, existe una tendencia a la conservación de las estructuras de madera y de algún modo, están recuperando el valor que perdieron con la aparición de otros materiales modernos y atractivos. La técnica Hole Drilling puede suponer una herramienta fundamental para devolver la confianza necesaria para promover la conservación de estas estructuras originales de madera.

b. Conocer el estado tensional real de las estructuras históricas de madera en servicio

A diferencia que en las estructuras nuevas, los valores de diseño no son válidos en estructuras históricas. La normativa actual de obligado cumplimiento (Código Técnico de la Edificación o CTE) puede suponer una limitación a la hora de trabajar en edificios históricos porque no contempla el estudio de las estructuras existentes. Textualmente, “no es adecuada la utilización directa de las normas y reglas establecidas en este CTE en la evaluación estructural de

edificios existentes, contruidos en base a reglas anteriores a las actuales para los edificios de nueva construcción” (CTE.DB-SE Anejo D).

Resulta necesaria una buena evaluación de la estructura en servicio que aporte información acerca de la situación real de la estructura sobre la que se va a intervenir para certificar su seguridad.

c. Aportar rigor científico a la inspección estructural

Los edificios históricos no son solamente apariencia, son también construcción y estructura y frecuentemente la información técnica es escasa o nula. La técnica Hole Drilling puede aportar rigor científico y la tecnología necesaria para el análisis estructural in situ de los elementos patrimoniales. Esos datos sirven de fundamento para la toma de decisiones, aportando objetividad, pudiendo quedar reflejados en un informe técnico que sirva para confirmar su seguridad estructural ayudando a la conservación y revalorización de estas estructuras históricas.

d. Contribuir al empleo de la madera como material constructivo sostenible

La Directiva 2010/31/UE de Eficiencia Energética en los Edificios planteado por la Comisión Europea (Parlamento Europeo 2010), es una estrategia que alude directamente a la construcción sostenible y requiere que los edificios públicos tengan un consumo energético casi nulo en 2018 y que en 2020 se haga extensible a todos los edificios. La madera, como material de construcción, puede ser y será uno de los puntos clave para conseguir “edificios energéticamente eficientes, fomentando tecnologías ecológicas y el desarrollo de sistemas y materiales de eficiencia energética en edificios nuevos y reformados”. Entre las estrategias se hace alusión a otros conceptos como arquitectura bioclimática, materiales renovables o bioconstrucción. La técnica Hole Drilling puede hacerse extensible, al igual que el resto de las técnicas de inspección, a edificios contemporáneos o futuros cuyas estructuras sean de madera y requieran ser inspeccionados.

2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos que se presentan a continuación aluden a las tareas que van a realizarse durante la investigación que acomete esta Tesis Doctoral.

a. Estudiar el comportamiento elástico de la madera desde un nuevo punto de vista

Estudiar la madera como material, desde su estructura interna, haciendo especial hincapié en la anisotropía, hasta su concepción como elemento estructural, estudiando específicamente la geometría de los planos que componen las piezas estructurales. Se estudiará el comportamiento elástico de la madera desde el punto de vista de la relajación de las tensiones y se definirán unas relaciones matemáticas entre esas tensiones existentes en los

elementos portantes y las deformaciones por relajación de las mismas.

b. Puesta a punto de la técnica Hole Drilling en elementos estructurales de madera

A nivel teórico y como aportación científica, la finalidad de esta Tesis Doctoral es desarrollar y poner a punto la técnica de Hole Drilling dentro del sistema de inspección, análisis y evaluación de las estructuras de madera y que sirva de base empírica a la hora de tomar decisiones. La técnica fue aplicada en elementos del Patrimonio anteriormente, pero únicamente sobre elementos constructivos de piedra. Por primera vez se realizan ensayos en piezas de madera. La madera es un material muy recurrente geográfica e históricamente y que sale a la luz en muchas obras de restauración o rehabilitación, pero su comportamiento es complejo. La afirmación de que la técnica puede ser útil aplicada en este material, es un paso más en el mundo de la evaluación estructural in situ y en la caracterización de materiales. Se realizarán los ensayos necesarios para poner a punto la técnica sobre este material.

c. Incluir la técnica Hole Drilling dentro de las técnicas de evaluación estructural in situ

La tendencia actual en el estudio de la madera estructural en edificios existentes es utilizar técnicas in situ para la evaluación y análisis del estado de la pieza en el propio edificio. Por eso, otro objetivo fundamental es demostrar que la técnica Hole Drilling, dentro de las técnicas poco destructivas (*Minor Destructing Testing* - MDT) (Lombillo, Thomas et al. 2013), es válida para hallar los estados tensionales, derivados de las cargas que soportan las estructuras de madera en servicio. Se trata de introducir la técnica dentro del contexto de los métodos y técnicas de evaluación experimentadas internacionalmente durante años, para una mejor y cada vez más completa caracterización in situ.

d. Divulgar la técnica y fomentar su uso entre los técnicos cualificados

En el ámbito de la conservación del Patrimonio, la inspección de estructuras de madera se ha convertido en algo habitual. Las inspecciones tienen como objetivo fundamental la medición de parámetros observables, lo que ha dado lugar al desarrollo, estandarización y divulgación de diversos procedimientos y técnicas. En la inspección de estructuras, es recomendable que todo técnico conozca y maneje esas técnicas disponibles. En el caso que acomete a esta Tesis Doctoral, las aplicaciones en ejemplos reales de la técnica de Hole Drilling sirven para dar a conocer esta nueva aplicación de la técnica en el mundo de las inspecciones. En definitiva, además de poner a punto la técnica, lo que se pretende es impulsar su aplicación. Finalmente, se apuesta porque los profesionales del sector tengan constancia de su existencia, de su gran potencial y utilidad y se acabe por asimilar la técnica de Hole Drilling como una herramienta fundamental en la inspección de las estructuras lignas.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La puesta punto de una técnica entraña un trabajo fundamentalmente experimental, habiéndose planteado esta investigación como tal desde el inicio. Un buen planteamiento de las actividades que se van a llevar a cabo a lo largo de la investigación es fundamental, determinando un inicio y un final al proceso experimental correspondiente a esta Tesis Doctoral. Diseñar la investigación significa definir cuál va a ser el alcance del estudio, la población objeto de estudio, la muestra que se va a testar (número de ensayos, dimensiones de las probetas, etc.) y cuál será la manera de realizar los ensayos y de procesar los datos.

3.1 Material de ensayo

Especie objeto de estudio:

Pinus radiata D. Don (origen CAPV)

Tipo de ensayos:

Compresión y Flexión (axial, perpendicular y oblicua)

Tipo de probetas:

Madera aserrada de tamaño estructural MEG ($b < 70$ mm)

Dimensiones probetas:

Compresión (dimensión transversal, 200 mm x 200 mm)

Flexión (dimensión transversal, 90 mm x 50 mm)

Número de probetas:

Al menos 10 de cada tipo

3.2 Desarrollo experimental

Se define un método a seguir durante el proceso experimental, aludiendo a las siguientes tareas:

a. Ensayar la técnica Hole Drilling en el laboratorio

El camino experimental empieza por diseñar los ensayos de laboratorio para poner a punto la técnica. Se plantean dos tipos de ensayos, en función de la sollicitación a la que se someta la pieza. En construcción, habitualmente se encuentran elementos trabajando a compresión o elementos trabajando a flexión. En consecuencia, se contemplan esos dos tipos de ensayos en laboratorio simulando esas dos situaciones reales.

Ensayos a Compresión: En una primera fase experimental se plantean ensayos de compresión, a realizar en el laboratorio de la Escuela de Arquitectura de Donostia - San Sebastián (UPV/EHU). Estos ensayos reproducen o simulan la situación de carga de un poste o pie derecho (u otro elemento sometido a compresión axial) o en zapatas o “tximelak”, elementos de transición entre postes y vigas que soportan una compresión perpendicular y que se dan habitualmente en las estructuras históricas para evitar punzonamientos.

Ensayos a Flexión: En una segunda fase experimental se plantea reproducir la situación estructural de una viga o vigueta (u otro elemento estructural sometido a flexión, por ejemplo en cerchas de cubierta). Estos ensayos serán llevados a cabo durante una estancia de investigación que duró varias semanas en la E.T.S. de Ingenieros Agroforestales de Palencia (Universidad de Valladolid).

b. Definir el comportamiento elástico-mecánico de la madera

El esquema matemático que se va a seguir en este proceso requiere el cálculo de una matriz de *compliance* (que define el comportamiento elástico) y el cálculo de los módulos elásticos en dos direcciones principales del material. En este caso, el módulo elástico paralelo a las fibras de la madera y el perpendicular a las mismas.

Matriz de *compliance*: En el desarrollo de la Tesis, se observará que cada material bajo una determinada sollicitación tiene un comportamiento elástico concreto tras la operación de Hole Drilling. Ese comportamiento elástico se traduce en una matriz 3 x 3, que se denomina a lo largo de la Tesis, matriz de *compliance*. Definir esa matriz de *compliance* para cada especie arbórea y para cada tipo de sollicitación es uno de los objetivos fundamentales de este estudio. La matriz de *compliance* hace posible la relación entre tensión y deformación en la aplicación de esta técnica.

Módulos de elasticidad: Por un lado, se determinarán los valores de los módulos elásticos (Módulos de Young) en las principales direcciones elásticas de la madera. En las piezas de tamaño estructural utilizadas en los ensayos el contenido de singularidades (nudos, fendas, gemas o desviaciones de la fibra) es alto (Arriaga, Íñiguez et al. 2007) y pueden afectar a las propiedades. Los valores que se tendrán en cuenta y aplicarán a efectos de cálculo, serán los obtenidos en los ensayos realizados en la presente investigación.

Esta Tesis plantea por el momento el estudio de una sola especie arbórea (*pinus*

radiata D. Don), pudiendo extrapolarse a otras especies de manera análoga. Se propone el estudio y aplicación de la técnica en otras especies botánicas en próximas campañas experimentales.

c. Comprobación de los valores obtenidos y confirmación de la validez de la técnica

Una vez finalizada la campaña experimental de obtención de datos acerca del comportamiento elástico del material (Módulos de Young y Matrices de *compliance*, en los dos tipos de ensayo), se realizarán algunos ensayos en el laboratorio para la comprobación de dichos datos tanto para el caso de los elementos sometidos a compresión como para los elementos sometidos a flexión.

Comprobación en el laboratorio: Las primeras comprobaciones de los datos se realizarán en los laboratorios para corroborar la validez de la técnica y de los datos obtenidos hasta el momento. Se denominan ensayos de comprobación o “a ciegas”. La finalidad de estos ensayos es la estimación de las discrepancias entre las tensiones aplicadas mediante las máquinas de laboratorio y las calculadas mediante la formulación de Hole Drilling.

Comprobación en una estructura real en servicio: El proceso experimental llegará a su culmen con la aplicación de la técnica de Hole Drilling en ejemplos reales de arquitectura. Así mismo se definirá la técnica como apta para trabajar in situ, después de haber puesto en práctica la realización del ensayo con las complicaciones de la aplicación lejos del laboratorio.

Sirva este Capítulo 3 para entender la dinámica que se va a seguir para la elaboración del cuerpo central de esta Tesis Doctoral, básicamente experimental. Pero antes es recomendable conocer algunas pautas que rodean y cercan la aplicación de esta técnica y del material.

Capítulo 4

LA MADERA

Se ha mencionado ya la importancia de incluir la técnica Hole Drilling en el proceso de evaluación estructural in situ, pero igual de importante es el material sobre el que se plantea la nueva aplicación. Se ha considerado oportuno incluir un capítulo donde aportar algunas especificaciones y aclaraciones fundamentales acerca de la madera para uso estructural y también de la especie escogida para la realización de estas primeras investigaciones.

4.1 La madera como material

Pocos materiales de construcción han sido tan ampliamente utilizados geográfica e históricamente como la madera. Sus aplicaciones han sido, y son, muchas y muy variadas. Por eso es habitual encontrarlo en forjados, fachadas y cubiertas de muchas construcciones o como esqueleto portante de cualquier edificación, tenga el porte que tenga (Figura 4.1 y Figura 4.2).



Figura 4.1

Fachada principal con el secadero del Caserío Igartubeiti en Ezkio-Itsaso (Gipuzkoa)

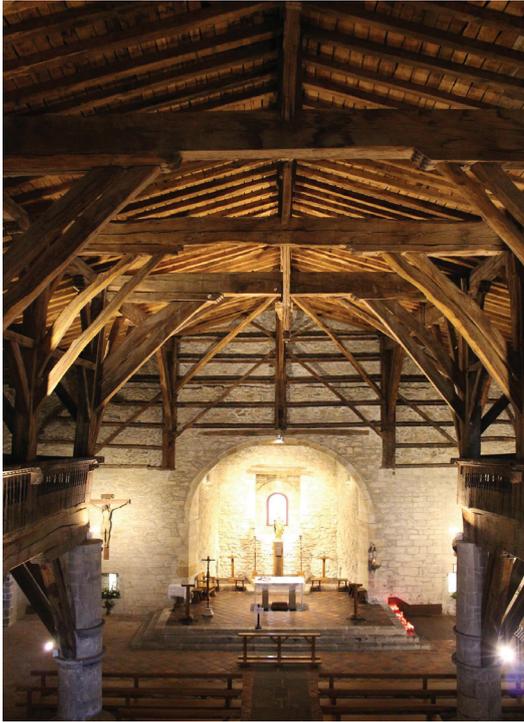


Figura 4.2

Estructura portante de la Ermita de la Antigua en Zumárraga (Gipuzkoa)

La aplicación de la madera en la construcción es casi inmediata teniendo en cuenta que no es un material industrial, conformado ni transformado por el ser humano, sino que crece de forma natural en los bosques.

En la Figura 4.3 los carpinteros de Albaola escogen árboles según su forma para extraer piezas específicas, mediante plantillas previamente diseñadas, para la reconstrucción de la Nao San Juan, el barco ballenero del siglo XVI. Los carpinteros de ribera, no tan lejos de la arquitectura, conocen bien los árboles y los seleccionan de antemano: *“Los robles corvos nos darán piezas estructurales (varengas, genoles y otras piezas parecidas); la veta de la madera debe seguir la forma de la pieza, para que ésta tenga la máxima resistencia. Por lo tanto, es preciso ir al bosque con las plantillas de las piezas a buscar los robles corvos que necesitamos. Es un verdadero reto el encontrar las formas que necesitamos, ya que son formas muy específicas y, además, de gran tamaño”* (www.albaola.com).

En la Figura 4.4 se observa cómo un árbol puede ser elegido por su forma para extraer una pieza específica que desempeñe una determinada función estructural sin apenas transformación. En el caso de la izquierda sujetando un voladizo en la plaza de Pasajes de San Juan.



Figura 4.3

Carpinteros de Albaola escogiendo un roble del cual poder extraer una pieza concreta para la reconstrucción de la Nao San Juan

(Fuente: www.albaola.com)



Figura 4.4

Pieza estructural extraída de un árbol elegido ex profeso para soportar un voladizo en Pasajes de San Juan (Gipuzkoa)

Pero no siempre es necesaria la búsqueda de árboles con formas específicas, la madera es un material relativamente ligero y manejable, facilitando la construcción y permitiendo la labra, los cortes y, en consecuencia, el ensamblaje de distintas piezas para obtener las funciones estructurales necesarias (Figura 4.5).

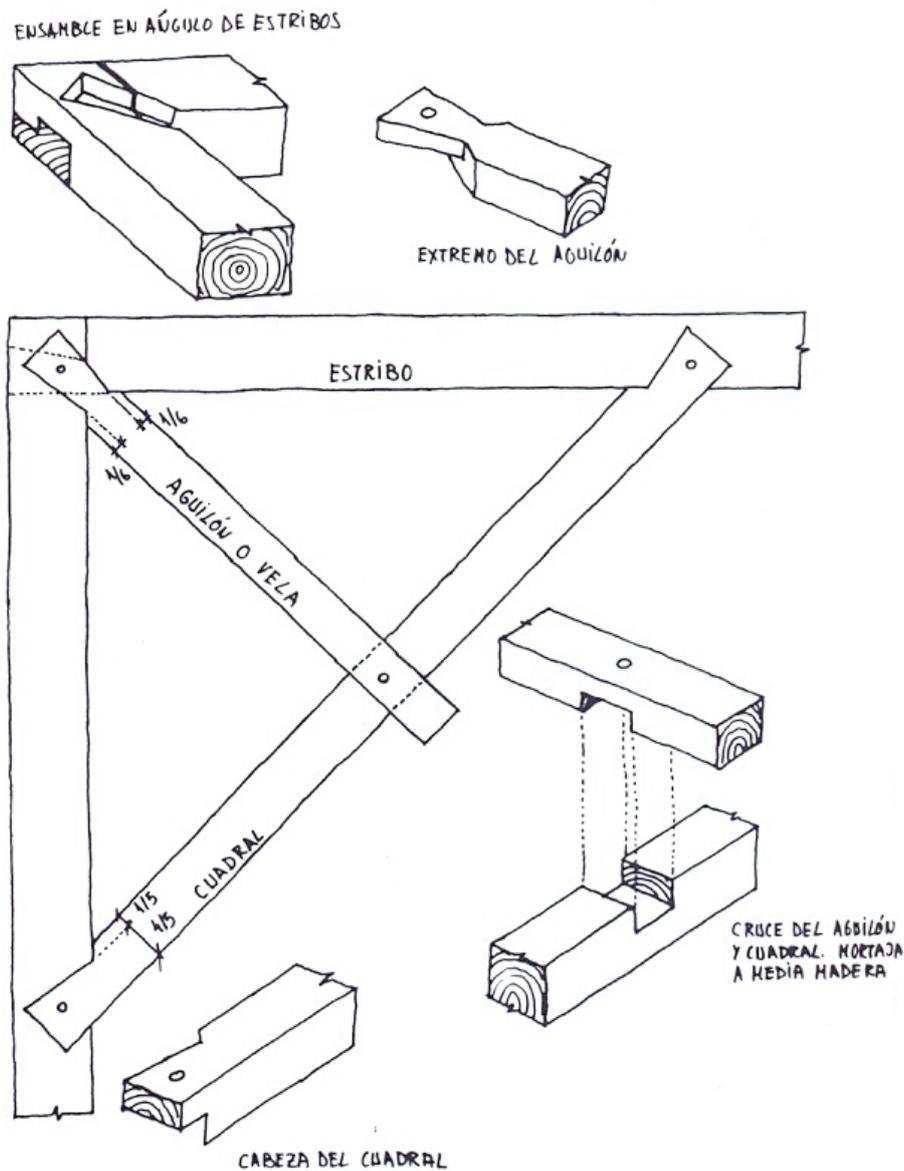


Figura 4.5
Distintas uniones y ensamblajes para atar una esquina (Arriaga, Peraza et al. 2002)

Por otro lado, la madera es un material que apenas varía desde la tala del árbol hasta que llega a los edificios en forma de elemento estructural, por eso es recomendable conocer algunas de las características que la definen. Conocer la estructura interna o composición de la madera ayuda a comprender la mayor parte de sus propiedades, características y comportamientos que afectan a la construcción y a las estructuras. Aunque, en ocasiones, se hable de atributos positivos o negativos de la madera, lo cierto es que la madera es como es, y cuanto más se conozca objetivamente acerca del material, más inteligentemente será utilizado (Lloyd Wright 1928).

4.1.1 Estructura interna de la madera

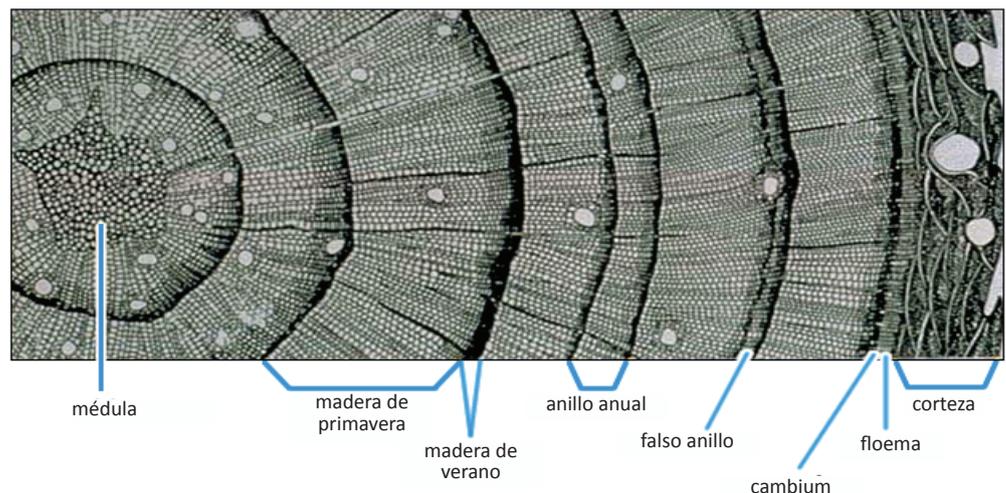
La madera es un material natural, orgánico, heterogéneo, anisótropo e higroscópico que procede de un organismo vivo, del tronco y las ramas de los árboles. Anatómicamente, la madera es una materia fibrosa y porosa, cuya estructura celular interna está compuesta por haces de tubos huecos orientados según el eje de crecimiento del árbol. Existen numerosos estudios y publicaciones científicas en torno a la estructura interna de este material y sobre las distintas especies, destacando en España el trabajo inicial desarrollado por García-Esteban y Guindeo-Casasús tanto en frondosas como en coníferas (García-Esteban, Guindeo-Casasús 1990, García-Esteban, Guindeo-Casasús 1998).

Debido a esta organización tubular, compuesta por varias capas concéntricas (Figura 4.6), se definen los anillos de crecimiento y las diferentes direcciones de comportamiento. Estas características hacen de la madera un material de construcción muy especial del que hay que conocer todos los factores que influyen en su definición como tal.

Figura 4.6

Vista microscópica de los anillos de crecimiento y las diferentes partes componentes del tronco de una madera de conífera en su sección transversal

(Fuente: NOAA Paleoclimatology Program)



Se trata de un material de construcción muy especializado, perfectamente diseñado para dar respuesta a determinadas funciones. No se trata de un material tecnológico sino de una estructura diseñada por la naturaleza y perfeccionada durante millones de años para servir a las necesidades propias de una planta viva; la conducción del agua y de la savia de la raíz a la copa, almacenamiento de sustancias bioquímicas y sostén de sí misma (Forest Products Laboratory (US) 1987).

Material orgánico

La madera es una estructura biológica compleja compuesta de química y células que forman un organismo vivo. Químicamente, como otros muchos materiales biológicos, la madera es un carbohidrato compuesto fundamentalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno en proporciones aproximadas de 1:2:1, respectivamente (Smith, Landis et al. 2003). Estos tres elementos forman las sustancias primarias que se distinguen dentro de la madera y que se conocen como celulosa, hemicelulosa y lignina. Esta composición puramente orgánica hace que la madera sea un material especial, por un lado ecológico y biodegradable pero, por otro lado, susceptible de ataques y deterioros. La celulosa y la hemicelulosa se componen fundamentalmente de azúcares mientras que la lignina es un polímero presente en las paredes celulares encargado de dar rigidez y cohesión a las fibras.

Entre las causas de los deterioros destacan los agentes bióticos, también conocidos como xilófagos (de *xyl(o)* ξύλον en griego 'madera' + *phag(o)* -φαγος en griego "que come"), refiriéndose a los hongos e insectos que comen madera en la cadena trófica. Todos los xilófagos pueden afectar en distinta medida a la madera. Aunque se determinen diferentes grados de afección o deterioro, siempre habrá que tratar de erradicar y subsanar el problema desde la raíz.

Los agentes atmosféricos o abióticos, como los rayos solares y la lluvia, también afectan a las propiedades físico-mecánicas de la madera colocada en el exterior provocando efectos diversos, desde el cambio de color debido a la incidencia de los rayos ultravioleta pasando por la aparición de fendas o llegando, a veces, a estados de pudrición muy graves por la interacción de la humedad y el calor (rayos infrarrojos) o fendas por heladas (Arriaga, Peraza et al. 2002).

Además su condición leñosa hace de la madera un material combustible, en el que hay que tener en cuenta su comportamiento ante el fuego. Generalmente puede decirse que hay que distinguir dos conceptos, la reacción y la resistencia al fuego. La madera reacciona ante la presencia de llama, iniciándose una combustión en la parte más expuesta. La superficie de la madera tiene que



Figura 4.7

Sección interior intacta de un lote de madera quemada

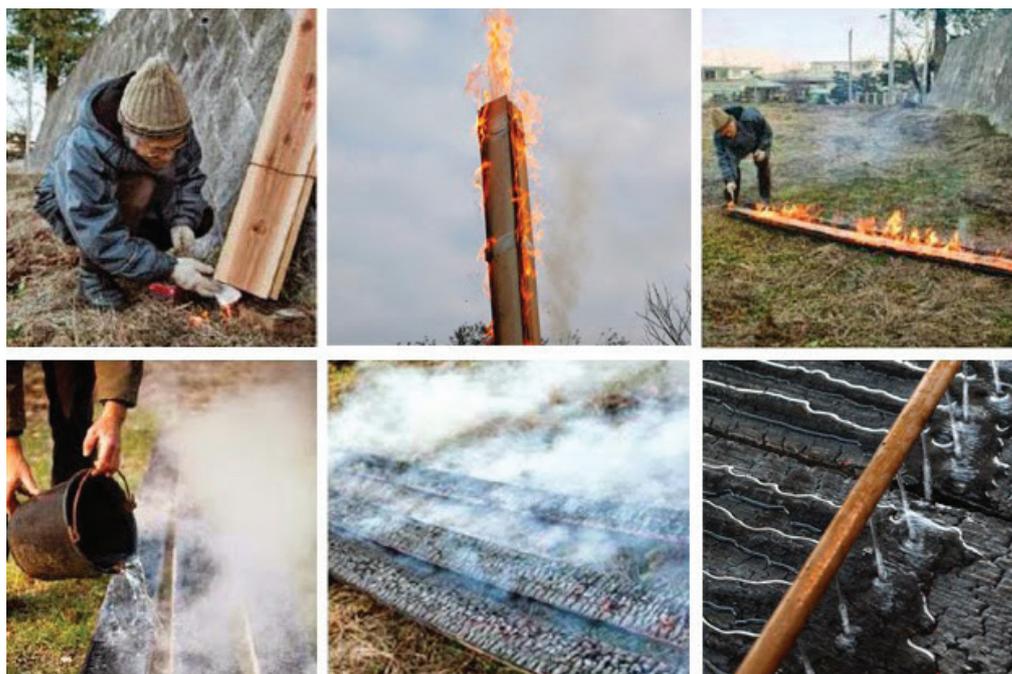


Figura 4.8
Proceso de protección
superficial mediante la acción
controlada del fuego
(Fuente: Terunobu Fujimori,
arquitecto)

alcanzar unos 300°C para que se produzca la ignición. En la superficie de la madera se origina una capa o costra carbonizada, que siendo seis veces más aislante que la propia madera, protege la capa inmediatamente posterior, permaneciendo intacto el interior (Figura 4.7). En consecuencia la madera es capaz de seguir cumpliendo su función estructural durante el incendio, ya que no pierde las propiedades resistentes en el interior. La pérdida de la capacidad portante se debe a una reducción de la sección resistente. Se denomina sección residual a la que queda intacta tras la extinción del incendio, pudiendo seguir cumpliendo la función estructural. A menudo un aumento en la escuadría puede servir como sistema de protección ante incendios en el cálculo de una estructura de madera (Eurocódigo 5: Parte 1-2 y CTE-SI). Por otro lado, sin presencia de llama, la madera necesita una temperatura superior a 400°C para comenzar a arder. Otras propiedades de la madera que influyen en el incendio son su contenido de humedad, que ayuda a la protección ya que ésta debe evaporarse antes de comenzar la combustión y la densidad. Cuanto más densa sea la madera, normalmente en frondosas, más difícil será que prenda y más lenta la combustión.

Otros materiales, como el acero, aunque no reacciona ante el fuego, pierden su rigidez rápidamente al calentarse. El hormigón es un material mucho más estable ante el fuego pero su resistencia se ve muy mermada si el fuego alcanza las armaduras metálicas.

A diferencia de lo que se pueda pensar, la acción del fuego controlada, puede incluso servir para proteger la madera. Existe una técnica tradicional japonesa, conocida como *Sugi Ban* o *Yakisung* (Figura 4.8), que consiste en carbonizar superficialmente la madera para protegerla de la acción de los agentes destructores (bióticos o abióticos) y aportar mayor durabilidad.

Material heterogéneo

Se dice que la madera es un material heterogéneo porque no hay un árbol igual a otro. Existe una gran diversidad especies y de géneros, y cada árbol tiene sus propias características y singularidades por las vicisitudes de su propio crecimiento. Cuando se traslada este factor al mundo de la construcción, se dan diferencias incluso entre los productos lúgneos procedentes de las distintas trozas de un mismo tronco (altura de corte en el tronco) o de la parte del tronco que proceda (interior, exterior, radial, tangencial, etc.), como se indica en la Figura 4.9. Todo esto se traduce en una aparente dificultad a la hora de prever el comportamiento de una estructura de madera.

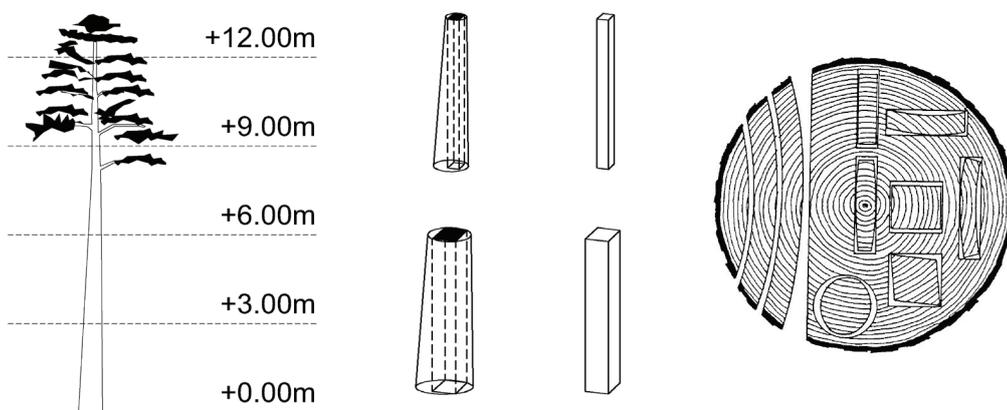


Figura 4.9

Extracción de piezas de madera a partir de un tronco. A la izquierda y centro, en función de la troza o la altura en el tronco (Arriaga, Íñiguez et al. 2007) y, a la derecha, según de la parte del tronco en que se extraiga, con las deformaciones propias de cada pieza tras el secado

(Fuente: www.abetoyarce.com)

En el mundo de la construcción se diferencia fundamentalmente madera procedente de dos categorías botánicas (Figura 4.10): la procedente de coníferas (botánicamente, gimnospermas) y la que procede de frondosas (botánicamente, angiospermas).



Figura 4.10

Forma genérica de una especie de conífera (izquierda) y forma genérica de una especie de frondosa (derecha)

Las coníferas son especies más básicas, o menos especializadas, cuya composición celular es simple. Todas las células, denominadas traqueidas, son iguales, paralelas al eje del árbol y sirven tanto para sostener el árbol como para transportar la savia de las raíces a la copa. Dentro de esta descripción se encuentran los abetos, piceas, alerces, cedros y pinos, todas ellas bastante parecidas entre sí.

A través del microscopio, en las frondosas se pueden diferenciar cavidades celulares más grandes, llamados vasos, cuya función específica es la de transportar la savia en el sentido longitudinal del árbol. Se distinguen también radios leñosos, que a diferencia de lo que se pueda pensar, no sirven para “arriostrar” las células longitudinales sino para ayudar a la conducción de la savia a las capas más internas. En nuestra geografía, entre las distintas especies de frondosas se encuentran robles, hayas, castaños y olmos, existiendo entre ellos más diferencias que las existentes entre las distintas especies de coníferas. A nivel microscópico las diferencias entre la composición celular de coníferas y frondosas es obvia. Puede observarse cierta homogeneidad en las células de las coníferas (imagen de la izquierda en la Figura 4.11) y mayor heterogeneidad entre las células de las frondosas (imagen de la derecha en la Figura 4.11). Otra característica que sirve para identificar una composición celular de madera de conífera es la presencia de canales resiníferos (Figura 4.15, en la pág. 22), inexistentes en las frondosas.

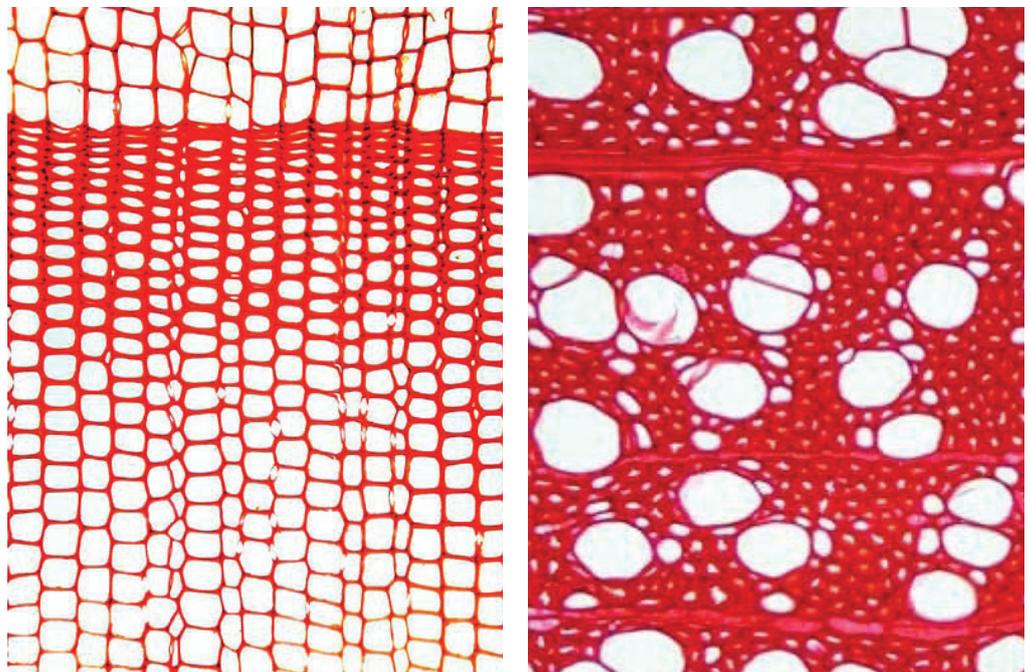


Figura 4.11

Sección transversal microscópica de una especie de conífera, a la izquierda, y sección transversal microscópica de una especie de frondosa a la derecha (Schoch, Heller et al. 2004)

(Fuente: www.woodanatomy.ch)

Generalizando, puede decirse que la madera de las coníferas presenta una mayor homogeneidad y que las distintas especies de este grupo son bastante parecidas entre sí, mientras que las frondosas son más diversas y complejas en su composición celular.

Material anisótropo

La madera tiene un comportamiento diferente y distintas propiedades físicas y mecánicas según la dirección en la que se estudie. Ese carácter variable según las principales direcciones elásticas define la clara anisotropía del material. En el caso de la madera las tres direcciones principales son ortogonales entre sí, por eso a este caso concreto de anisotropía se le llama ortotropía.

Las principales direcciones elásticas de la madera son la axial, la radial y la tangencial. En cualquier punto del tronco, aleatoriamente, puede determinarse un origen de coordenadas en el que se podrán establecer esas tres direcciones, a excepción de la médula. La médula es solamente axial, pero según se aleje el origen de coordenadas de la médula, en cualquier dirección, se definirá una dirección radial. En un plano de corte transversal al tronco, uniéndolo el punto de origen de coordenadas y el punto dónde se corte la médula se forma la dirección radial. En ese mismo plano, y en una dirección tangencial a los anillos de crecimiento y perpendicular a la radial se define la dirección tangencial. Finalmente, la dirección axial, partiendo del mismo punto de origen de coordenadas discurre de manera longitudinal paralela a la médula o eje del tronco (Figura 4.12).

(A) Dirección Axial

Paralela a las fibras y eje de crecimiento del árbol.

(R) Dirección Radial

Perpendicular al eje de crecimiento del árbol, forma parte del plano transversal que corta el eje del árbol. Uniéndolo la médula y el origen de coordenadas se establece un radio.

(T) Dirección Tangencial

Dirección perpendicular a las dos anteriores. Esta dirección define también el plano transversal y discurre tangencialmente a los anillos de crecimiento del árbol.

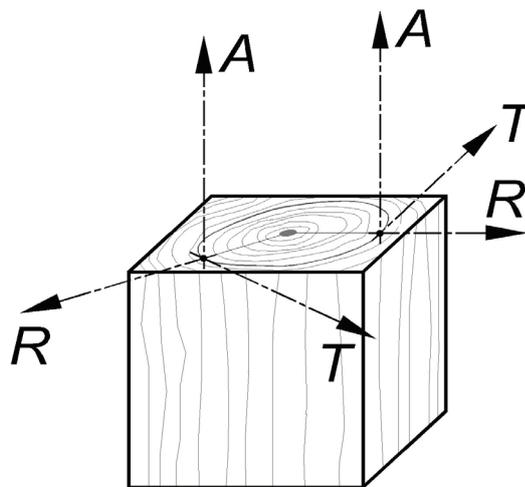


Figura 4.12

Principales direcciones de ortotropía de la madera

En función de esas tres direcciones los planos de corte en la madera estructural son de distinta índole; existen planos formados por las direcciones axial-tangencial o por las direcciones axial-radial, ambos planos paralelos al eje de crecimiento, y por las direcciones tangencial-radial, siendo éste un corte transversal al eje del árbol en el que se pueden ver los anillos de crecimiento claramente (Figura 4.13). Los planos de corte de carpintería tienen gran influencia en las características geométricas de los elementos estructurales de madera y deben tenerse en cuenta siempre.

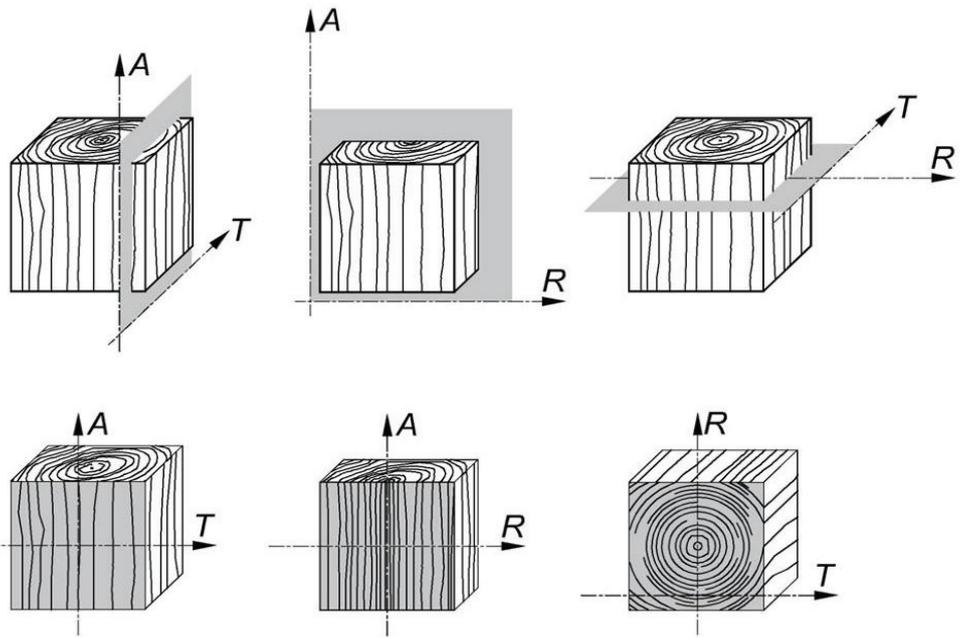


Figura 4.13

Diferentes planos de corte según las principales direcciones de comportamiento de la madera (arriba) y los planos formando las diferentes caras que quedan a la vista en los elementos estructurales (abajo)

Cualquier tipo de madera está influenciada por una clara direccionalidad según la orientación de las fibras. Por lo general, las propiedades mecánicas (elasticidad, resistencia y las reológicas) son mayores en esa dirección. Las propiedades reológicas hacen referencia a las relaciones entre esfuerzo y deformación. En algunos materiales, como es el caso de la madera, estas relaciones pasan por distintas fases o regiones. La Figura 4.14 muestra las relaciones reológicas en un material biológico.

Sin duda la dirección axial es dominante con respecto las otras dos. Propiedades como dureza y rigidez son propiedades que varían mucho en función del tipo de madera y de la dirección en la que sea testada. La madera presenta un alto grado de anisotropía y además siempre se ve influenciada por el grado de humedad (Dinçkal 2011).

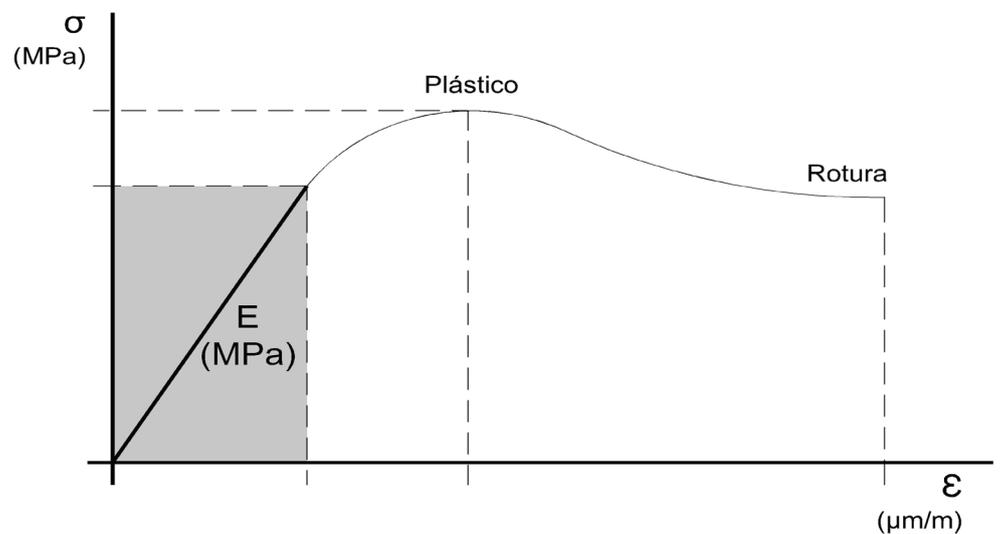


Figura 4.14

Curva típica tensión(σ)-deformación(ϵ) de un material biológico (Buitrago, López et al. 2004)

Hay que apuntar que los ensayos llevados a cabo en la investigación que acomete esta Tesis han sido realizados en la fase elástica del material, región marcada en gris de la Figura 4.14, entendiendo que un elemento constructivo en servicio se encuentra en esta fase. Las relaciones entre tensiones y deformaciones en la región elástica son lineales y su pendiente es, en definitiva, el módulo elástico o de Young.

La dirección coincidente con la dirección de las fibras de la madera y con el eje del árbol se denomina longitudinal o axial. Por otro lado, las direcciones radial y tangencial componen el plano transversal a la dirección axial. Frecuentemente, se simplifica definiendo una dirección “transversal” o “perpendicular” a las fibras refiriéndose al plano compuesto por esas direcciones radial y tangencial, aunque no sean idénticas (Figura 4.15). No es de extrañar, por tanto, que a veces se haga referencia a esas dos direcciones indistintamente. Aunque las propiedades y comportamientos radiales y tangenciales son sensiblemente parecidos en comparación con la dirección longitudinal, no deben confundirse.

La afirmación de que la madera es un material ortotrópico desde su composición celular y forma de crecimiento en anillos concéntricos, es un pilar fundamental en la investigación que se desarrolla a continuación. En condiciones de ortotropía hay que hacer referencia a tres direcciones perpendiculares entre sí, y en la aplicación de esta técnica sí se hará distinción entre radial y tangencial. La aplicación de la técnica de Hole Drilling se ve influenciada significativamente por este hecho y se volverá a hacer hincapié en este factor varias a veces a lo largo de la Tesis Doctoral.

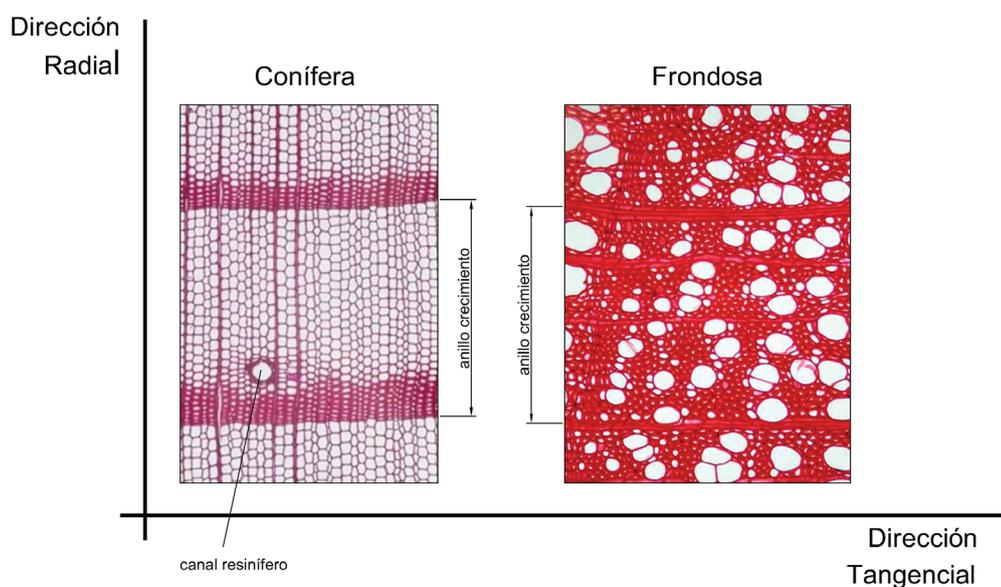


Figura 4.15
Distinción entre la dirección radial (eje de ordenadas) y la dirección tangencial (eje de abscisas) en dos ejemplos de secciones transversales vistas al microscopio (Smith, Landis et al. 2003)

Material higroscópico

Se denomina higroscopicidad a la capacidad que posee la madera, material poroso, para absorber y ceder agua al ambiente que le rodea. La madera sirve de regulador de humedad del ambiente en el que se encuentre, produciéndose un equilibrio higroscópico distinto en la madera según la humedad relativa y la temperatura del aire que le rodea. Del mismo modo que el aire cambia constantemente sus condiciones climáticas, el punto de equilibrio de la madera también cambia constantemente. El comportamiento de la madera se ve muy influenciado por este factor puesto que la madera sufre alteraciones volumétricas en función del grado de humedad a la que se encuentre. Variaciones constantes en el contenido de humedad supone la hinchazón y la merma constante de los elementos estructurales de madera por lo que deben ser evitadas a toda costa.

En realidad, la higroscopicidad define la variación de la densidad cuando la humedad de la madera varía en un 1%. Kollman diseñó una gráfica para poder determinar las relaciones entre el contenido de humedad de la madera y la humedad relativa del aire cuando la temperatura es constante (Kollmann, Côte Jr 1968). Normalmente, en diversas bibliografías y normativas, se aportan datos referidos a un 12% de humedad relativa, es decir, madera desecada. Si no se especifica la humedad relativa de una madera se presupone un 12 %. La Figura 4.16 muestra la gráfica de las curvas isoterma que adquiere la madera en diferentes condiciones ambientales. En uso corriente del lenguaje, se hace referencia al contenido de humedad de un elemento de madera de un modo coloquial refiriéndose a los distintos niveles (Tabla 4.1).

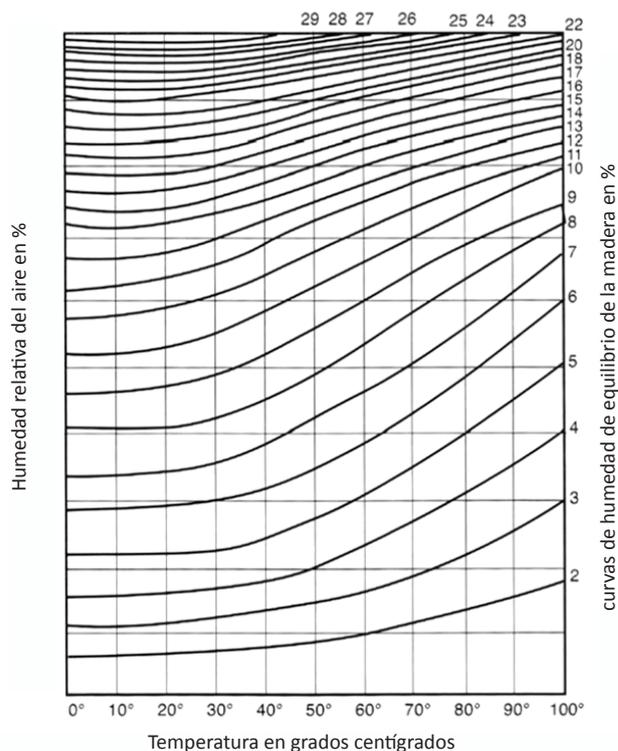


Figura 4.16
Curvas de equilibrio
higroscópico de la madera
(Kollmann, Côte Jr 1968)

Tabla 4.1

Denominación del estado de la madera en función de su contenido de humedad

| Contenido de humedad (%) | Denominación |
|--------------------------|----------------------------|
| >30 | Madera saturada |
| 30-23 | Madera semi-seca |
| 22-18 | Madera comercialmente seca |
| 17-13 | Madera secada al aire |
| <13 | Madera desecada |
| 0 | Madera anhidra |

En líneas generales las prestaciones de la madera, sea cual sea la especie, son inversamente proporcionales al contenido de humedad. El 30% es un punto de inflexión en esa escala ya que a partir de ese volumen de agua contenido en la madera, se considera una madera saturada de agua estabilizándose la pérdida de prestaciones.

Que la madera intercambie moléculas de agua con el ambiente que le rodea no sería un problema si no fuera porque el contenido de humedad tiene un efecto inminente en el volumen de la pieza de madera. En mojado se hincha y merma cuando se seca. La variación volumétrica en la dirección longitudinal es despreciable en comparación con las que se producen en las otras dos direcciones. En la dirección tangencial la variación volumétrica es del orden del 10% y de la mitad aproximadamente en la radial (Figura 4.17).

Figura 4.17

Variación volumétrica aproximada de hinchazón y merma de la madera en función de la dirección

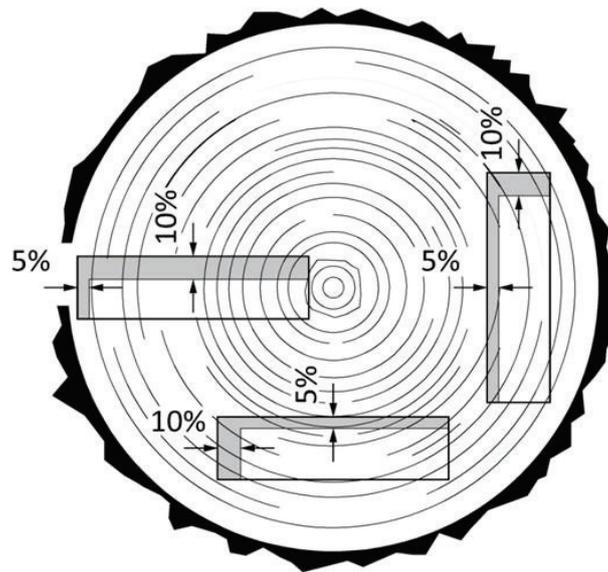


Figura 4.18

Madera apilada durante el proceso de secado (Fuente: www.carpinteriaartistica.com)



A menudo, un proceso de secado incorrecto de la madera puede dar lugar a otros deterioros relacionados como fendas, inestabilidad dimensional, curvaturas y alabeos. Además de estar relacionados con las variaciones en el contenido de humedad, por el carácter higroscópico de la madera, están directamente relacionados con la anisotropía de la madera y el corte del que proceda la pieza estructural.

En el secado al aire (Álvarez Noves, Fernández-Golfín 1992), muy común en estas latitudes, el proceso debe ser cuidadoso y paulatino, recomendando que la madera permanezca apilada y cubierta pero bien ventilada (Figura 4.18) con el fin de evitar curvaturas y alabeos indeseados (Figura 4.19).

Figura 4.19

Defectos de la madera por hinchazón y merma, en función del corte de la pieza (Álvarez Noves, Fernández-Golfín 1992)

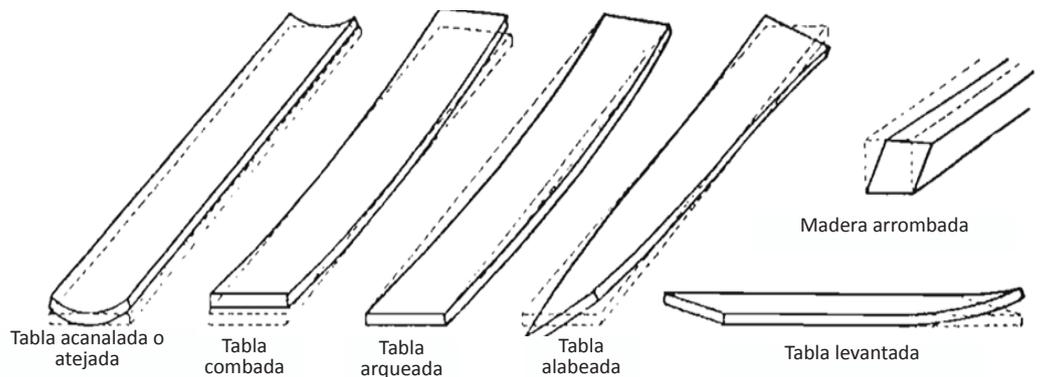


Figura 4.20

Ejemplo de un testero de una pieza estructural sometida a humedad constante: los insectos xilófagos han afectado a la albura (parte más externa) y los hongos al duramen (parte oscura en el interior)

(Cortesía de Ainara Martínez de Albéniz, arquitecta)

Por otra parte, un alto contenido de humedad incrementa ineludiblemente la posibilidad de aparición de hongos e insectos debido a que los tejidos se reblandecen y resultan más atractivos para estos xilófagos. Ocasionalmente, se puede llegar a la destrucción total de la estructura si no se soluciona a tiempo (Figura 4.20).

Evitar un exceso de humedad y lugares donde el agua pueda depositarse es fundamental para la buena conservación de las estructuras de madera.

En resumen, siempre que se caracterice o se estudie una madera hay que hacer referencia a todos estos factores influyentes en las características de la madera. Debe estudiarse cada caso individualmente y ha de prestarse especial atención a la dirección en la que está colocada la pieza objeto de estudio (anisotropía), a la especie arbórea de la que proviene el elemento estructural (heterogeneidad) y a su contenido de humedad (higroscopicidad), ya que las propiedades son muy variables.

4.1.2 La madera como material sostenible

El sector de la construcción ha sido uno de los más contaminantes durante décadas, generando residuos difícilmente reciclables. Actualmente se promueve y fomenta, el uso de la madera en la construcción. La madera es un recurso natural, renovable e inagotable y alternativa a los productos altamente contaminantes, siempre y cuando que se respeten los principios forestales de gestión sostenible y un uso responsable de los bosques, garantizando su reforestación. El aumento de la sensibilidad social en temas medioambientales ha dado lugar al establecimiento de criterios y legislaciones que aseguren el uso racional de este recurso. Hoy en día es fácil reconocer una buena gestión forestal gracias a los mercados PEFC (*Programme for the Endorsement of Forest Certification*), FSC (*Forest Stewardship Council*), entre otros sellos de certificación. Es fundamental que los productos constructivos de madera estén dentro de esta cadena de gestión forestal sostenible para poder garantizar la continuidad de los montes como recurso natural y una correcta explotación de los mismos.

Arquitectos, diseñadores de productos e incluso los propietarios de las viviendas demandan cada vez más productos que certifiquen su procedencia de una fuente sostenible. Una construcción verde, o como se denomina en el mundo anglosajón “*green building*”, tiene que empezar por una buena elección de los materiales. Construir en madera no significa la destrucción de los bosques, al contrario, significa dar continuidad a un proceso natural evitando emisiones nocivas a la atmósfera.

Bajo consumo energético en su “fabricación” y transporte

Evidentemente hablar de fabricación de la madera carece de sentido. El crecimiento de la madera como materia prima, se produce de una manera totalmente natural en forma de árbol, siendo capaz de reproducirse por sí misma. El consumo energético no se refiere a la fabricación, sino a la energía consumida durante el proceso de transporte y transformación de la madera, siendo muy bajo en comparación con el consumo energético en la fabricación de otros materiales de construcción. Se denomina transformación al proceso que se inicia con la extracción de la madera de los bosques, pasando el aserrado y secado de los troncos, y finalmente se convierte en diferentes productos terminados que sirven para la construcción. Son muchos los materiales

y productos de construcción derivados de la madera utilizados con fines estructurales desde la mínima transformación (primera transformación) hasta llegar a los productos más modernos y tecnológicamente mejorados (segunda transformación). Las piezas de madera constituidas simplemente por el tronco despojado de ramas y corteza, cuya sección es perceptiblemente circular, se denomina madera en rollo o “rollizo”. La madera aserrada, más trabajada, es medida, cortada y escuadrada en las plantas de primera transformación, dando lugar a secciones rectangulares normalizadas. La madera aserrada, frecuentemente, también es conocida como madera maciza, ya que se trata de elementos estructurales obtenidos de una sola pieza o de un único tronco. Estas piezas deben ser clasificadas estructuralmente según la normativa (visual o mecánicamente) y deben cumplir con valores de resistencia, rigidez y densidad establecidos. Finalmente, se debe prestar atención a los modernos productos estructurales generados en una segunda transformación, derivados de la madera aserrada, que existen en la actualidad y cuyo futuro es prometedor y muy competitivo alcanzando resistencias y comportamientos optimizados (madera laminada, microlaminada, tablero CLT, etc.) (Arriaga, Esteban et al. 2010).

En relación con el suministro de las piezas de madera a las obras, su ligereza en relación a su resistencia estructural permite ahorrar energía en los medios de transporte, carga y descarga y en la puesta en obra, suponiendo una ventaja energética indiscutible (Arriaga, Álvarez et al. 1994).

Facilidad de reciclado

El ciclo de vida de la madera es cerrado ya que se trata de un material totalmente reciclable y biodegradable. Históricamente el sistema de reciclado más eficaz ha sido la reutilización de los elementos estructurales de un derribo en la construcción de una nueva estructura. El ciclo de vida comienza en los bosques, ya que el árbol crece y se desarrolla de forma natural en un ecosistema. Al cabo de unos años, variable dependiendo de las especies, se lleva a cabo la extracción de la materia prima. Esa extracción se debe realizar una vez se haya alcanzado un diámetro suficiente para que la madera pueda servir estructuralmente. A continuación los troncos, que es lo que se refiere a materia prima, pasan directamente a las industrias de primera transformación, en las que se ubican los aserraderos y las fábricas de tablero y chapa. Los residuos de estas plantas, retales, astillas y serrín sirven para producir otros productos. Las piezas estructurales de madera aserrada y normalmente escuadrada, sirven para levantar estructuras y pueden desarrollar esa función en los edificios durante siglos, siempre y cuando el diseño sea correcto y se realicen las actuaciones de mantenimiento adecuadamente (vigilar humedades, ataques xilófagos, incendios, etc.). Una vez que aparentemente ha finalizado su vida útil, al menos estructuralmente, por derribo o por sustitución de piezas, los elementos de madera pueden reciclarse utilizándose de nuevo como materia

prima en otros procesos productivos. Esa madera retirada del edificio puede servir para fabricar otros productos derivados como tableros o chapa, puede utilizarse para hacer palets o como combustible en forma de astillas, pellets o leña. En el peor de los casos, donde esa madera no tenga un destino, acabará desintegrándose orgánicamente (Figura 4.21).

En definitiva, no hace falta ningún proceso excesivamente complicado ni caro para eliminar los productos de madera una vez han cumplido su función.

(1) Extracción de la madera

Fomentar economía forestal sostenible

(2) Primera transformación

Aserraderos y fábricas de tablero y chapa

(3) Producción de materiales

Productos estructurales (madera laminada, CLT, etc.)

(4) Construcción/Consumo

Productos de madera utilizados en distintos fines

(5) Reciclado

Otros productos y combustible

(6) Reutilización/Consumo de biomasa

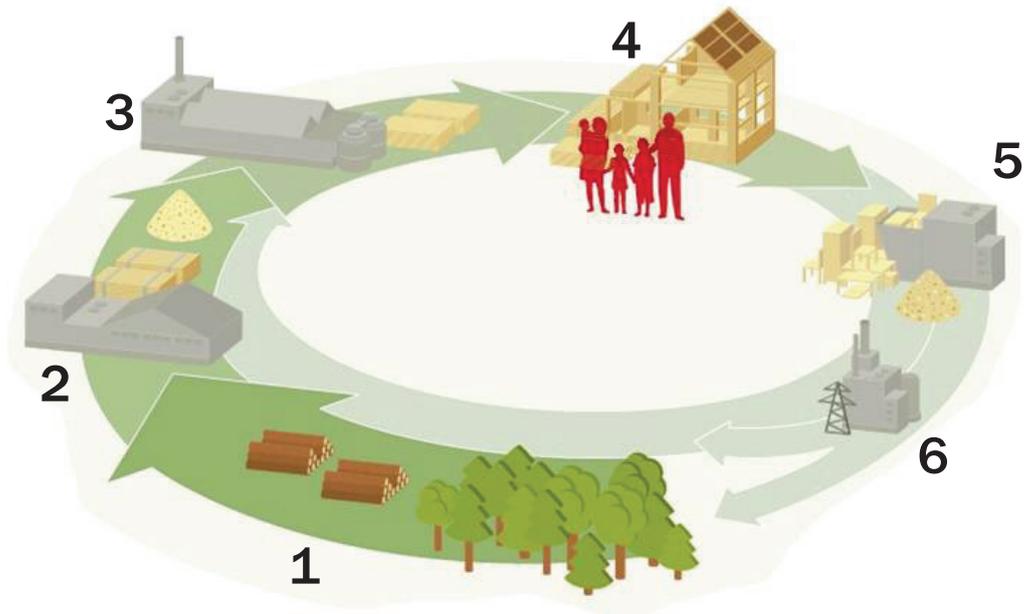


Figura 4.21

Ciclo cerrado de la madera (Fuente: www.egger.com)

Huella ecológica

Hoy en día el resurgir de la madera como material estructural y constructivo puede deberse a un aumento notable de la sensibilización social respecto al medioambiente y a la huella ecológica que dejan otros materiales de construcción. La sensibilización en este tema no es solo a nivel social sino también normativo. Concretamente, la Decisión 406/2009/CE del Parlamento Europeo alude directamente al mundo de la construcción cuando se refiere al esfuerzo que deben hacer los estados miembros por reducir las emisiones de gases a la atmósfera. En consecuencia, insta a todos los estados a establecer políticas y medidas con ese fin antes del año 2020. Consecuentemente, en España el Real Decreto 163/2014 tiene por objeto la creación del registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono (Gobierno de España 2014). Indiscutiblemente, el futuro apunta hacia una construcción cada vez más verde o sostenible, a la reducción de los consumos de energía en los edificios empezando por su construcción y hacia una sabia elección de los materiales constituyentes. Estas nuevas perspectivas hacen una alusión directa a fomentar el uso de la madera en arquitectura (Figura 4.22).

Figura 4.22

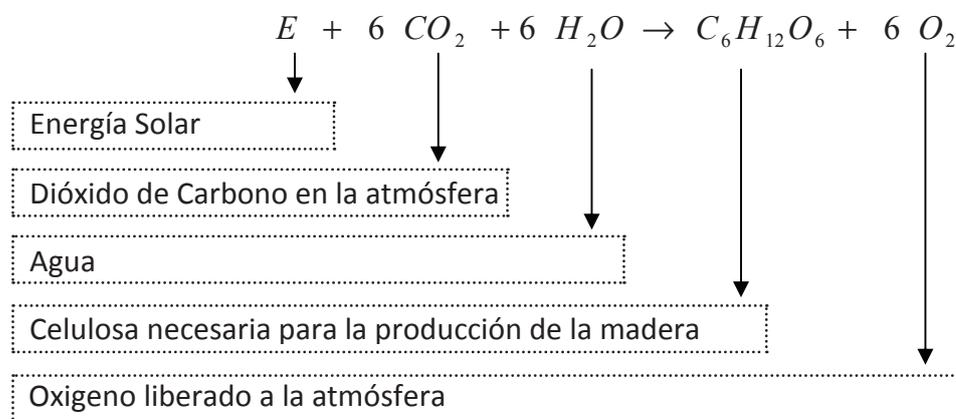
Acopio de madera para construir una vivienda unifamiliar y, a la derecha, proyecto de un edificio en altura para ser construido en Viena íntegramente en madera.

(Fuente: www.theguardian.com/cities/2015/mar/01/vienna-plans-worlds-tallest-wooden-skyscraper)



Por otro lado, está probado que la mayor parte de las causas del efecto invernadero tienen su origen en las emisiones de CO_2 a la atmósfera. Estas emisiones favorecen la retención de la radiación solar y en consecuencia, al calentamiento global y al cambio climático. La madera participa activamente como almacén de carbono y, sin lugar a duda, aumentar el consumo de los productos de madera incrementa el “stock” de carbono almacenado.

La madera facilita el cumplimiento de los compromisos medioambientales de nuestros países ya que es capaz de transformar el dióxido de carbono de la atmósfera en oxígeno libre. Los árboles necesitan la energía solar actuando junto con el agua para poder transformar moléculas de dióxido de carbono en celulosa y oxígeno. La celulosa es necesaria para el propio crecimiento del árbol y por tanto en la producción de madera, liberando el resto se libera en moléculas de oxígeno. Ese fenómeno se llama fotosíntesis:



Para reducir la huella de carbono en los edificios según el Real Decreto 163/2014 (Gobierno de España 2014) y cumplir las bases acordadas en Kyoto (Protocolo de Kyoto 1998), se promueve la utilización de madera procedente de los bosques gestionados de forma sostenible. Los productos de madera apenas emiten CO_2 a la atmósfera, sobre todo en comparación con otros materiales de construcción y además es un almacén natural de dióxido de carbono (Figura 4.23). Mientras que otros materiales como el acero, el hormigón o el plástico son incapaces de almacenar ni una molécula de CO_2 , una tonelada de madera almacena una tonelada de carbono, aproximadamente y produce 0,7 toneladas de oxígeno (Queipo De Llano Moya, Juan, González Rodrigo et al. 2010).

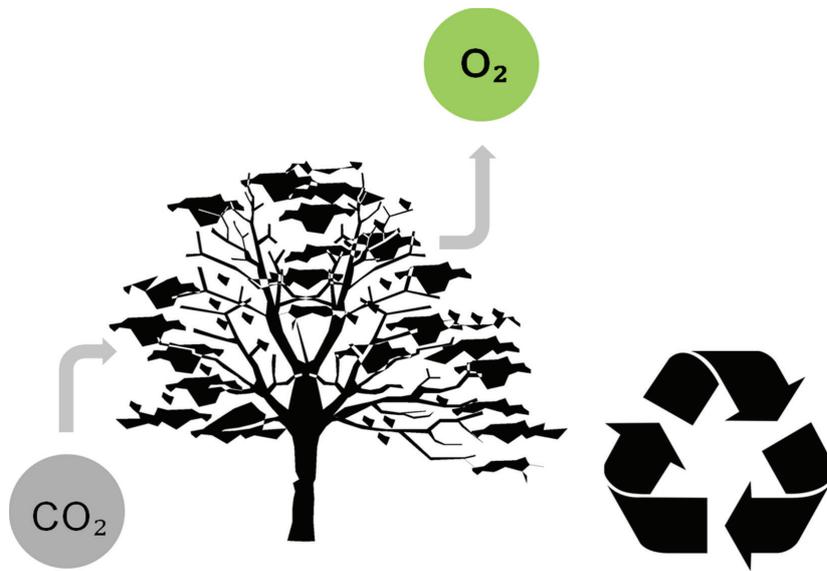


Figura 4.23

Los árboles transforman el dióxido de carbono de la atmósfera en oxígeno libre en su proceso de crecimiento y además es un material totalmente renovable y reciclable en la Naturaleza

Material aislante

La madera, debido a su estructura interna, es un material poroso. Su organización celular, en forma de tubos huecos, hace de este material un buen aislante térmico, eléctrico (en seco) y acústico. La razón fundamental de que sea un buen aislante es que entre las distintas células de la madera existen cavidades donde se almacena aire. El aire contenido en las células además de aislar, aligera el material, facilitando su manejo y transporte. Las fibras de la madera, compuestas por celulosa y lignina, son capaces de absorber la energía de las ondas acústicas, reduciendo el ruido y evitando fenómenos como la reverberación.

La conductividad térmica del aire en reposo es muy baja, $\lambda_{\text{aire}} = 0,024 \text{ W/mK}$ a 20°C . La conductividad térmica de una sustancia leñosa tiene un valor intermedio entre los componentes sólidos y el aire contenido en las cavidades. La conductividad térmica también es una propiedad anisótropa, siendo su valor alrededor de 15 veces menor en la dirección perpendicular a las fibras que en la paralela (Álvarez Noves 1982).

Tabla 4.2

Densidad y propiedades higrotérmicas de algunos materiales utilizados en construcción (Catálogo de elementos constructivos del CTE)

| Material | ρ | λ | c_p | μ |
|----------------------------------|-----------|-----------|-------|----------|
| Aluminio | 2700 | 230 | 880 | infinito |
| Acero | 7800 | 50 | 450 | infinito |
| Hormigón armado | 2300-2500 | 2,30 | 1000 | 80 |
| Ladrillo macizo | 2300 | 0,85 | 1000 | 10 |
| Vidrio flotado | 2500 | 1 | 750 | infinito |
| Yeso, dureza media | 600-900 | 0,30 | 1000 | 4 |
| Madera de frondosas (peso medio) | 565-750 | 0,18 | 1600 | 50 |
| Madera de coníferas (peso medio) | 435-520 | 0,15 | 1600 | 20 |
| Tablero de partículas | 450-640 | 0,15 | 1700 | 20 |
| Tablero de fibras | 350-550 | 0,14 | 1700 | 12 |

Siendo:

- ρ Densidad (kg/m³)
- λ Conductividad térmica (W/m·K)
- c_p Calor específico (J/kg·K)
- μ Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua (adimensional)

Utilizar la madera en la construcción, aparte de ser estéticamente agradable y de aportar confort a las viviendas, colabora positivamente a la hora de calefactar y/o refrigerar las estancias. Al tener una conductividad térmica baja, no absorbe la energía necesaria para calentar o enfriar el aire del ambiente. Aunque ya se ha mencionado, es la baja conductividad térmica de la madera la que le proporciona tan alta resistencia frente al fuego.

Todas estas propiedades de la madera tienen un reflejo en la ecología, y además de fomentar el uso de este material en las construcciones del futuro, es determinante conservar las estructuras ya existentes, de las que se puede aprender mucho.

4.1.3 La especie objeto de estudio: *Pinus radiata* D. Don

La especie que ha sido objeto de los ensayos realizados en este trabajo para la puesta a punto de la técnica de Hole Drilling es el pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) originaria de la Comunidad Autónoma Vasca. Se considera preciso dedicar un espacio a la descripción y entendimiento de esta especie.

Por un lado, el objetivo principal de la tesis es averiguar si la técnica es efectiva en la madera entendida en su generalidad, es decir, sin reparar en exceso en la especie elegida para estos primeros ensayos. Se ha optado por realizar los ensayos en este pino por ser una de las coníferas más abundantes entre las plantaciones forestales de España en la actualidad, repartida mayoritariamente en Euskadi y cuya expansión y utilización es generalizada en la Comunidad Autónoma Vasca. De hecho, el Gobierno Vasco y otras instituciones vascas han fomentado la redacción de un Plan Estratégico en el sector de la Madera (PEMA) y una campaña conocida como Gure Zura que muestra el compromiso del sector forestal y de la madera de Euskadi con la sostenibilidad (Figura 4.24).



Figura 4.24

Imágenes corporativas de la campaña del Gobierno Vasco para fomentar el buen uso de la madera autóctona

(Fuentes: www.nasdap.ejgv.euskadi.eus/PEMA2015 y www.habe.euskadi.eus)

El nombre científico de esta conífera que ocupa una gran parte de nuestros bosques es *Pinus radiata* D. Don (D. Don, por el botánico escocés David Don que la descubrió), pero es también conocido como pino insigne (o insignis, en latín) o pino de Monterrey, por su verdadero origen en la costa pacífica de Norteamérica. Esta especie fue introducida en el paisaje vasco a raíz de la industrialización en el siglo XIX con el ánimo inicial de utilizar su madera para proveer astillas a las industrias del papel, industria de gran potencia en Navarra y el País Vasco en ese tiempo. Carlos Adán Yarza plantó hacia 1840 los primeros ejemplares en el parque botánico de Zubieta en Ispaster, cerca de Lekeitio en Bizkaia (Figura 4.25).

En 1870 se comenzó a explotar generalizadamente y desde entonces, las masas de pino radiata han estado sujetas a una selvicultura intensiva. Para los propietarios forestales, se trata de una especie que supone un alto rendimiento a corto plazo por su rápido crecimiento, propiciando su rápida implantación en aquellos años (Figura 4.26).

Figura 4.25
Probablemente uno de los primeros ejemplares de pino radiata ubicado en el Palacio de Zubieta (Ispaster, Bizkaia)
(Michel 2004)



Figura 4.26
Ejemplo de alteración del paisaje con la repoblación de pino radiata en Zeanuri (Bizkaia). Vistas desde Ipinaburu, arriba fotografía tomada a principios del siglo XX y, abajo, imagen correspondiente a la actualidad.



Fuente: (Michel 2004)

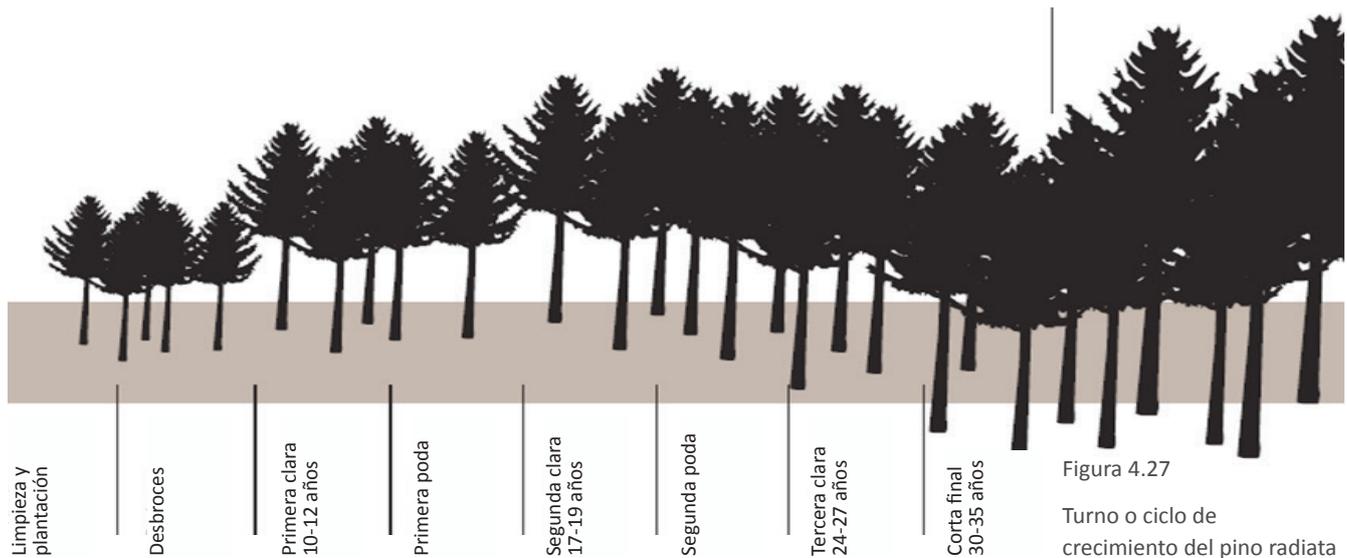


Figura 4.27
Turno o ciclo de crecimiento del pino radiata (Gobierno Vasco 2010)

Para el crecimiento de esta especie la lluvia es fundamental, alrededor de 900 mm anuales, asentándose mejor en territorios templados y de cota baja, sin sobrepasar 500 m sobre el nivel del mar. Es una especie muy sensible al frío y las heladas pero soporta bien el viento. Estas características necesarias para el crecimiento hacen de Euskadi un paraje ideal para su plantación.

Mario Michel Rodríguez es ingeniero de montes del Departamento de Desarrollo Económico y Competitividad del Gobierno Vasco y ha realizado una larga y profunda labor de investigación sobre pino radiata en la historia forestal vasca, incluyendo una Tesis Doctoral. Según apunta Michel (Michel 2004) al pino radiata en Euskadi se le aplican turnos de 30-35 años (Figura 4.27), con crecimientos de 9-11 m³/ha/año situándose, por tanto, entre las especies de crecimiento rápido.

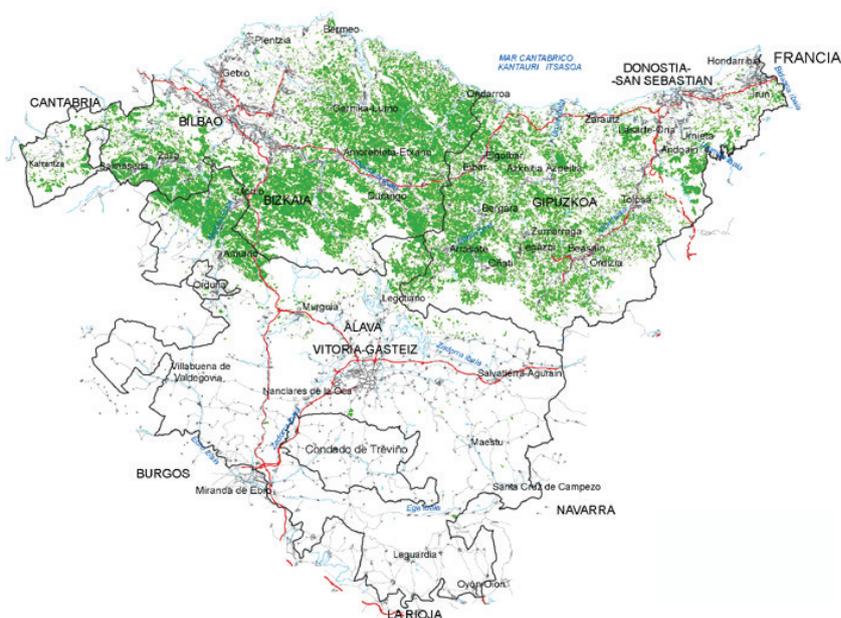


Figura 4.28
Masa forestal compuesta pino radiata en la EAE según el Inventario Forestal Vasco de 2011
(Fuente: www.nasdap.ejgv.euskadi.eus)

Según el Inventario Forestal del País Vasco de 2011 (www.nasdap.net/inventarioforestal) la superficie forestal arbolada es de 396.960 ha, de las cuales 192.000 ha son coníferas (Tabla 4.3) y 204.960 ha, frondosas (Tabla 4.4). Solamente el pino radiata supone unas 132.100 ha, es decir un 33% de la superficie total arbolada de la CAPV. La segunda especie más extendida es el haya (*Fagus Sylvatica*), cuya población es de 53.835 ha, refiriéndose a un 13 % de la población arbórea del mapa forestal vasco. Por un lado las coníferas, prestando atención a la superioridad del pino radiata sobre el resto de las especies de pino (Figura 4.28 y Tabla 4.3), y por otro lado los robles y el haya (Tabla 4.4).

Tabla 4.3

Proporción de superficie de coníferas en Euskadi en comparación años 2005 y 2011. (Fuente: www.nasdap.ejgv.euskadi.eus)

| Especie | Superficie 2005 (ha) | Superficie 2011 (ha) | Aumento 2005/2011 (%) |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| <i>Pinus radiata D. Don</i> | 137.466 | 132.084 | -4 |
| <i>Pinus pinaster</i> | 7.262 | 7.238 | 0 |
| <i>Pinus sylvestris</i> | 17.234 | 17.459 | 1 |
| Total coníferas | 195.537 | 191.999 | -2 |

Aunque existen otras especies de coníferas además de los pinos (*Pseudotsuga menziesii*, *Larix spp*, *Chamaecyparis lawsoniana*) en la tabla solo se muestran los pinos que suponen el casi el 82% de la superficie boscosa de Euskadi. Y dentro de esa mayoría aplastante solamente el pino radiata supone ya un 69% de la población de pinos. Es decir que si se tiene en cuenta exclusivamente la población de pinos, el radiata es totalmente predominante ocupando un 84% de la superficie (Tabla 4.4).

Tabla 4.4

Proporción de superficie de frondosas en Euskadi en comparación años 2005 y 2011. (Fuente: www.nasdap.ejgv.euskadi.eus)

| Especie | Superficie 2005 (ha) | Superficie 2011 (ha) | Aumento 2005/2011 (%) |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| <i>Quercus robur+petraea</i> | 15.071 | 16.469 | 9 |
| <i>Quercus pyrenaica</i> | 12.281 | 13.039 | 6 |
| <i>Quercus faginea</i> | 27.103 | 26.652 | -2 |
| <i>Quercus rubra</i> | 3.087 | 3.328 | 8 |
| <i>Quercus ilex</i> | 27.289 | 26.151 | -4 |
| <i>Fagus sylvatica</i> | 54.555 | 53.835 | -1 |
| Total frondosas | 201.164 | 204.963 | 2 |

Aunque sea una cuestión discutible (Ainz Ibarrondo 2008), ya que la introducción masiva de especies puede llevar a un desequilibrio forestal, con las consecuencias que esto conlleva (monocultivos, pérdida de la biodiversidad e impactos negativos sobre el suelo), la realidad es hoy por hoy existe un equilibrio entre las especies coníferas y las frondosas, repartiéndose por el territorio en

partes iguales, gestionando los bosques de una manera respetuosa, y con una tendencia a conservar las especies originarias.



Figura 4.29

Acopio de madera de *pinus radiata* D. Don (Michel 2006)

En cuanto al uso estructural de la madera, puede decirse que comienza en las décadas de 1980 y 1990, cuando desciende la demanda de esta materia prima en el sector papelerero. El reciclaje del papel hizo que disminuyera enormemente la necesidad de madera verde. Según datos aportados por Mario Michel (Michel 2006), el uso de pino radiata en la industria papelera suponía un 78,2% de la masa forestal en 1978 y fue descendiendo pasando a un 50,4% en el año 1985 y llegando a un 27,6% en 1996. Esta nueva realidad llevó a tener que replantear nuevos usos, entre ellos el estructural, para ese volumen de madera gruesa disponible en las masas forestales existentes de pino radiata. Lo que resulta indiscutible es que la forma del fuste del pino radiata, sin curvaturas, permite la obtención de longitudes de troza que sitúan a su madera en una posición aparentemente ventajosa para la utilización en la construcción frente al resto de pinos comunes (Hermoso, Carballo et al. 2007).

Sin embargo, al igual que ocurre con el resto de productos estructurales, la madera y sus derivados con destino al mercado estructural deben estar perfectamente caracterizados tanto en sus propiedades como en su comportamiento en obra, complicando su inclusión en el mercado. El conocimiento de las propiedades tecnológicas de esta madera disponible se tornó fundamental en ese panorama y fue entonces el Centro Técnico de la Madera del País Vasco (ZTB) en un convenio con el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), quienes iniciaron los procesos de caracterización de esta especie entre los años 1985 y 1988 (Fernández-Golfín, Conde García et al. 2008). Algo antes, al comienzo de los años 80, Vignote y su equipo (Vignote, Peraza et al. 1985) habían realizado algunos estudios de las propiedades físico-mecánicas de pino radiata pero en probetas libres de defectos, es decir, en probetas pequeñas. Algunos años

más tarde, otro equipo continuó la investigación, esta vez, en probetas de tamaño estructural al cerciorarse de que los datos obtenidos en piezas libres de defectos no se correspondían con la realidad de las estructuras (Seoane, Ortiz Gutiérrez 1989).

En España, gracias a las numerosas investigaciones que se han llevado a cabo recientemente por varios autores cada vez se conoce más acerca de la utilización estructural de esta especie (Michel 2004, Montón Lecumberri 2012, Mena 1998). Subrayar, además, el trabajo de varios investigadores reconocidos nacional e internacional (Acuña, Argüelles, Arriaga, Díez-Barra, Esteban, Fernandez-Golfín, Guaita, Hermoso, Iñiguez, etc.) colaborando activamente para que este pino junto con otras especies, pueda ser incluido en las normas de aplicación.

Han sido necesarios exhaustivos procesos de caracterización y clasificación estructural de la madera procedente de pino radiata con el fin de incluirlo en la Norma UNE 56544, sobre la clasificación visual de la madera de conífera aserrada para uso estructural. En consecuencia, la madera de pino radiata ha podido ser introducida en el mundo de la construcción como material estructural con las mismas garantías que el resto de los materiales de construcción. Todo apunta a que la madera estructural procedente del pino radiata se utilizará cada vez más en la construcción de nuevos edificios. Por un lado servirá como materia prima de los materiales tecnológicos conformados en base a madera y, por otro lado, en las labores de restauración y mantenimiento de las estructuras históricas de madera, en forma de refuerzos, sustituciones y saneados.

Los ensayos realizados sobre esta especie mediante Hole Drilling pueden ayudar, de alguna manera, a la caracterización y aportarán un conocimiento técnico extra en el comportamiento del pino radiata. Sin embargo, resulta muy difícil o imposible encontrar estructuras históricas totalmente compuestas por esta conífera en la arquitectura. Los ejemplos históricos en la paleta vasca de caseríos, palacios o casas torre son anteriores al siglo XIX, es decir, anteriores a la implantación de esta especie. En el caso de Euskadi, durante siglos las especies más utilizadas fueron del género *quercus*, es decir robles y encinas, y castaneas, comúnmente conocidas como castaños. Los pinos autóctonos, que también fueron utilizados ocasionalmente en construcción, eran el pino marítimo (*pinus pinaster*) y el silvestre (*pinus sylvestris*). Finalmente, existe una gran población de haya (*fagus sylvatica*) en la Comunidad Autónoma Vasca, que siendo una especie autóctona, no se ha utilizado para construir estructuras.

El pino radiata llegó relativamente tarde pero se prevé el potencial de la especie en el mercado de la restauración y rehabilitación de estructuras. En los últimos años ha sido masivamente potenciado por las instituciones, habiendo surgido empresas fabricantes de materiales de muy altas prestaciones tecnológicas a partir de tablas de pino radiata, como madera laminada o como tablero estructural (Figura 4.30).



Figura 4.30

Vista del montaje (arriba) y vista del final de la obra (abajo) de la Ikastola Laskorain en la localidad gipuzkoana de Tolosa. Arquitecto: Estudio de Arquitectura Juanjo Gurrutxaga

(Fuente: www.egoin.com)

4.2 La madera en la arquitectura

Madera y Arquitectura han formado siempre, con sus más y sus menos, un tándem. Existen numerosos ejemplos históricos, tanto de arquitectura sencilla y humilde como de gran porte a los que este material ha dado razón de ser. Hoy por hoy la arquitectura de madera suma adeptos cada día y son muchas las publicaciones y los profesionales que muestran interés por este binomio.

4.2.1 La madera en la historia de la construcción

La madera es uno de los materiales de construcción más antiguos que existe, siendo utilizado para construir allí donde hubiera un bosque. Su relación con la arquitectura viene después observar el comportamiento de los árboles en el bosque, en concreto, su capacidad de resistir los efectos gravitatorios y también los del viento. Esa capacidad portante de los árboles llevó a relacionarlos con sus posibilidades en la construcción de las cabañas primitivas (Figura 4.31). Numerosas revisiones históricas, en busca de los orígenes de la arquitectura, coinciden en establecer un inicio en esos refugios primigenios considerándolos los primeros edificios que sintetizan las “reglas naturales” de la construcción.

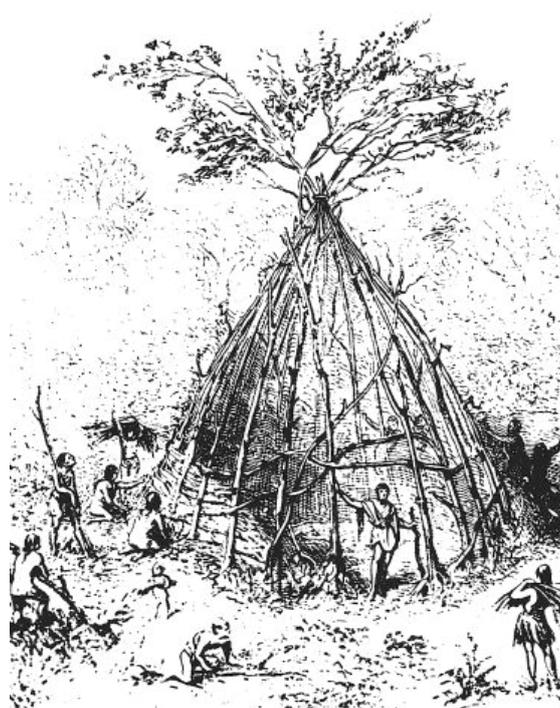


Figura 4.31
Cabañas primitivas según
Vitruvio (izquierda)
y de Viollet Le Duc (derecha)

Su abundancia, su relativa facilidad de manejo y la posibilidad de aplicación inmediata, ya que sin apenas transformación puede utilizarse para levantar estructuras, hicieron que el uso de la madera en el mundo de la construcción fuese directo. Incluso no habiendo herramientas que permitieran la tala y corte de los troncos, empezaron utilizándose las ramas para construir aquellos primeros refugios. El desarrollo de herramientas, y de técnica, dio paso a sistemas de construcción más complejos y perfeccionados.

La madera, un tronco, puede utilizarse para construir entramados sin apenas

transformación y durante décadas fue el único material capaz de resolver estructuras horizontales y cubiertas, debido a su capacidad intrínseca de soportar esfuerzos de flexión. Mientras, la piedra y el adobe se limitaban a soportar compresión en forma de muros, tapiales o pilares. Las estructuras de madera vivieron una larga evolución, resolviendo situaciones muy diversas y complejas.

Marco Vitruvio, escribió hacia el año 27 a.C., el que se considera primer tratado técnico sobre arquitectura y construcción, titulado “Los Diez Libros de la Arquitectura” (Vitruvio 2010). En esta obra se exponen detalladamente fundamentos sobre varios conceptos en lo referente a la construcción y diseño. En el Libro Segundo, el técnico romano se refiere a los materiales de construcción, y en concreto en el Capítulo 9 de ese libro, se aportan descripciones sobre las cualidades y usos de la madera, incluyendo nociones sobre la tala y las patologías. Vitruvio, en el tratado confirma la existencia de diferencias entre las distintas especies. En concreto se mencionan el roble, el olmo, el álamo, el ciprés o el abeto como las más adecuadas para la construcción. Cada árbol posee distintas cualidades por su propia naturaleza, específicas de su clase, haciendo referencia incluso a las calidades de la madera. Vitruvio muestra un especial interés por la madera de alerce, natural de las orillas del río Po y de las costas del Adriático. Preocupado por la combustibilidad de la madera en general, dice de esta especie que “no solo se mantiene a salvo de la carcoma y de la polilla, por poseer una savia nociva y fuerte, sino que además es incombustible”. En aquel tiempo ya se fue relegando el uso de la madera, seguramente por los numerosos incendios pero también por el afán de transformación de la capital del Imperio. La madera fue sustituida por materiales cada vez más “dignos” para construir termas, acueductos y demás monumentos. El emperador Augusto, en su lecho de muerte, resumió esa transformación con esta frase: “Encontré Roma como una ciudad de ladrillo y la dejé de mármol”.

El texto de Vitruvio, por el contrario, siguió teniendo repercusión entre los constructores de la Edad Media. En esta época las ciudades fueron colmatándose dentro de sus propias murallas. La madera volvió a ser un material fundamental para resolver estructuras horizontales entre medianeras. En las ciudades había por tanto muchos “hogares”, la gente vivía hacinada y los incendios eran frecuentes. En este contexto, ciudades cada vez más oscuras, la percepción negativa de la madera era generalizada, por el alto riesgo de incendio que suponía su carácter inflamable.

En Europa, puede considerarse la Revolución Industrial como un hito para el abandono definitivo de la madera como material estructural. La industria dio pie a la producción masiva y relativamente barata de ladrillo y acero.

En los países escandinavos, al margen de la tradición del Mediterráneo y estimando sus cualidades térmicas, la madera ha sido considerada y sigue considerándose el principal de construcción. Realmente, hasta hace

relativamente poco tiempo apenas existían alternativas a la madera para la construcción en estos países y puede decirse que se empleaba para todo. La construcción en madera tiene como inicio las casas de troncos apilados horizontalmente (Figura 4.32), evolucionando incesantemente hasta nuestros días.



Figura 4.32

Ejemplos de construcción con troncos horizontales en los países escandinavos

Los entramados ligeros, herencia del conocido sistema americano *balloon frame* (Figura 4.33), empezaron a desarrollarse en Europa en el siglo XIX, llegando a generalizarse en el siglo XX. Estas construcciones ligeras, a partir de perfiles normalizados y de tablero, pudieron desarrollarse con la aparición de los materiales aislantes, derivados también de materias ligneeas (serrín y papel bituminoso). Se trataba de un sistema revolucionario y muy expandido en los Estados Unidos, facilitando la construcción por su ligereza. Frecuentemente, los perfiles eran entramados en el suelo y posteriormente izados mediante cuerdas.



Figura 4.33

Ejecución de una vivienda en EEUU mediante el sistema de entramado ligero o *balloon frame*

Aunque la madera nunca ha desaparecido del panorama nórdico, es cierto que el empleo de la madera en la construcción en los países nórdicos, se vio fomentada por el buen desarrollo del sector forestal. Alvar Aalto es ejemplo de la generalización de la arquitectura de madera, al desarrollar en los años 40 las primeras casas prefabricadas con este material. En este periodo, coincidiendo con el fin de la Segunda Guerra Mundial, se iniciaron las tareas de reconstrucción en muchas regiones en Europa. Precisamente en estos años de posguerra Aalto regresó de América tras permanecer un tiempo en el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Allí había absorbido las tendencias en la construcción con madera del otro lado del Atlántico y aplicó sus conocimientos involucrándose con la regeneración de viviendas tras la Guerra. Existía entonces un programa de reconstrucción, en la que se necesitaban edificios modestos pero eficientes, y que fueran construidos rápidamente. La madera fue de nuevo, el material que mejor cumplía con este cometido. El sistema fue conocido como AA, diseñado por Aalto para la compañía Ahlström, se convirtió enseguida en el más innovador sistema estandarizado para esa labor regeneradora. En España, paralelamente comenzaron a construirse las “casas baratas”, proliferando rápidamente con el fin de solucionar el mismo problema de habitabilidad surgido tras la Guerra.

El panorama cambió sensiblemente, incluso en los países de tradición maderera, con la proliferación de las estructuras de hormigón armado. La madera fue relegada a un uso meramente de cubrición interior y aislante, quedando solamente visible en las viviendas del medio rural. Hoy en día, como ya se ha mencionado, los protocolos europeos y la preocupación por la conservación del medio ambiente, hacen que la madera vuelva a estar en boga entre los materiales de construcción, dando lugar a ejemplos modernos en la arquitectura contemporánea (Figura 4.34).



Figura 4.34

Interior de la capilla Kampi Chapel of Silence (arriba) e infografía de la Wood City (abajo), ambos ejemplos ubicados en la ciudad de Helsinki

Otra tradición que no pasa desapercibida en cuanto al buen uso de la madera en la arquitectura, es la oriental. La arquitectura tradicional nipona, desde su concepción más espiritual, ha estado en contacto con la naturaleza; jardines, lagos y paisajes evocadores. Es por eso que el material elegido para la construcción de sus templos, santuarios y casas fuese la madera. A menudo, la arquitectura japonesa recuerda a la china, en concreto a la estructura tradicional conocida como pagoda (Figura 4.35).



Figura 4.35

La gran pagoda en Nara (Japón), imitando las estructuras chinas

La madera es un material capaz de resolver estructuras horizontales con gran eficacia y es de recibo elegir para edificios con múltiples plantas (Figura 0.33). Al igual que en otros territorios, Japón también tuvo que hacer frente a las tareas de reconstrucción tras la Segunda Guerra Mundial, lo que supuso un salto tecnológico en la aplicación de la madera en viviendas express. Kenzo Tange es el máximo representante de este periodo.

Se manifiesta la destreza de la tradición carpintera oriental para resolver uniones y ensambles (Figura 4.36) en los ejemplos complejos y únicos que han llegado a través del conocimiento popular hasta hoy en día, sirviendo de inspiración en la actualidad.

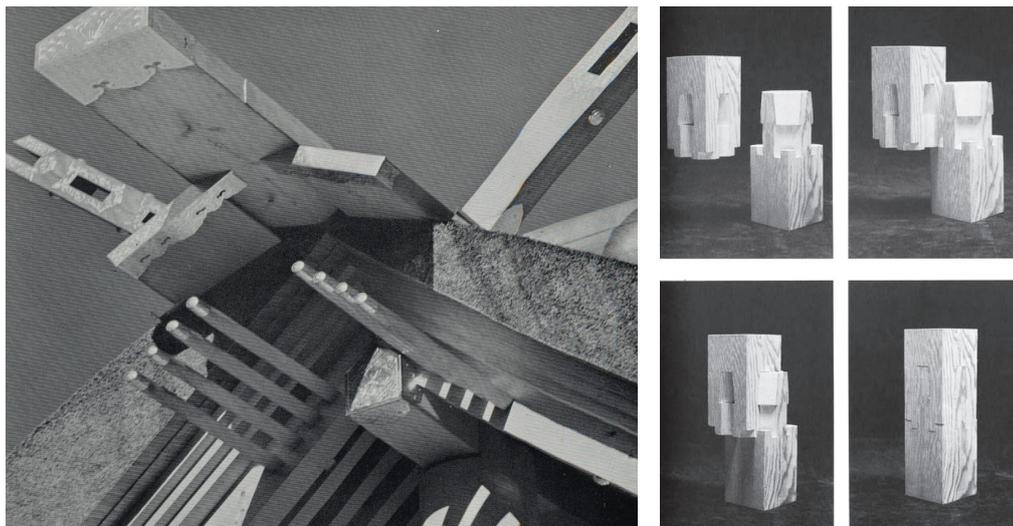


Figura 4.36

A la izquierda, detalles de la cumbre de la cubierta de la Ise Treasure House.

A la derecha, ejemplo de unión entre un poste y la pieza de sacrificio (sustituible) en contacto con el terreno (Sumiyoshi, Matsui 1991)

En la tradición constructora de España, el oficio de carpintero ha estado presente siempre. Es frecuente encontrar iconografía en la que se hace referencia a estos maestros carpinteros (Figura 4.37), a sus labores o a las herramientas que utilizaban en el proceso de adecuar el tronco a la función estructural. La Catedral de Santa María de Mediavilla en Teruel es uno de los ejemplos más exquisitos de la arquitectura mudéjar. Además del campanario y del cimborrio, la techumbre de madera fue declarada Patrimonio Mundial por la UNESCO en 1987. Las naves laterales están cubiertas por techumbres planas de doble vigueta y la central, con una armadura de par y nudillo policromada con pintura gótico lineal, en combinación con el arte mudéjar, en la que se recoge iconografía en referencia al proceso carpintero durante la ejecución de la catedral.

Figura 4.37

Iconografía de los maestros carpinteros trabajando en la propia construcción de la cubierta de la Catedral Santa María de Mediavilla de Teruel, representados en las tablas decorativas de la misma catedral



La Sociedad Española de Historia de la Construcción (www.sedhc.es), recomienda la revisión de varios tratados en el análisis de la historia de la construcción, tanto los que fueron publicados en España como los que fueron directamente escritos en español. Sin embargo, la documentación sobre sistemas de construcción en madera es prácticamente nula hasta el siglo XVII. Destacan las obras de López de Arenas y las de Fray Lorenzo de San Nicolás, específicamente sobre carpintería. El siglo XVIII no fue muy fructífero en cuanto a los tratados de construcción en madera se refiere, pero en el XIX volvieron a surgir los manuales técnicos acerca de las buenas prácticas del material.

1549. D. de. Sagredo. Medidas del romano
1552. S. Serlio. Tercero y cuarto libros de arquitectura
1582. L. B. Alberti. Los diez libros de arquitectura
1585. J. de. Arfe y Villafañe. De varia commensuracion
1593. J. Vignola. Regla de las cinco ordenes de arquitectura
1598. C. de. Rojas. Teórica y práctica de fortificación
- 1633. D. López de Arenas. Compendio de carpintería de lo blanco**
- 1639. Fr. Lorenzo de San Nicolás. Arte y uso de arquitectura**
1661. J. de. Torija. Tratado de todo género de bóvedas
- 1663 [1664]. Fr. Lorenzo de San Nicolás. Segunda Parte del Arte y uso de arquitectura**
1727. T. V. Tosca. Tratado de la montea y cortes de cantería
1738. A. Brizguz y Bru. Escuela de arquitectura civil
1747. J. García Berruguilla. Práctica de las resoluciones de la geometría
1760. J. de. Torija. Ordenanzas de la Villa de Madrid
1761. C. Perrault. Compendio de Vitruvio
1763. Ch. Rieger. Elementos de arquitectura civil
1766. A. Plo y Camín. El Arquitecto práctico
1766. D. de. Villanueva. Papeles críticos de Arquitectura
1776. J. de. Sotomayor. Modo de hacer incombustibles los edificios
1787. M. Vitruvio. Los diez libros de Arquitectura
1795. Simonin. Tratado de los cortes de cantería
1796. B. Bails. Arquitectura civil
1797. A. Palladio. Los cuatro libros de Arquitectura
1802. B. Bails. Diccionario de Arquitectura civil
1841. M. Fornés y Gurrea. Práctica del arte de edificar
1846. M. Fornés y Gurrea. Álbum de proyectos de Arquitectura
1848. M. Matallana. Vocabulario de Arquitectura civil
1857. M. Fornés y Gurrea. Práctica del arte de edificar (2a. ed.)

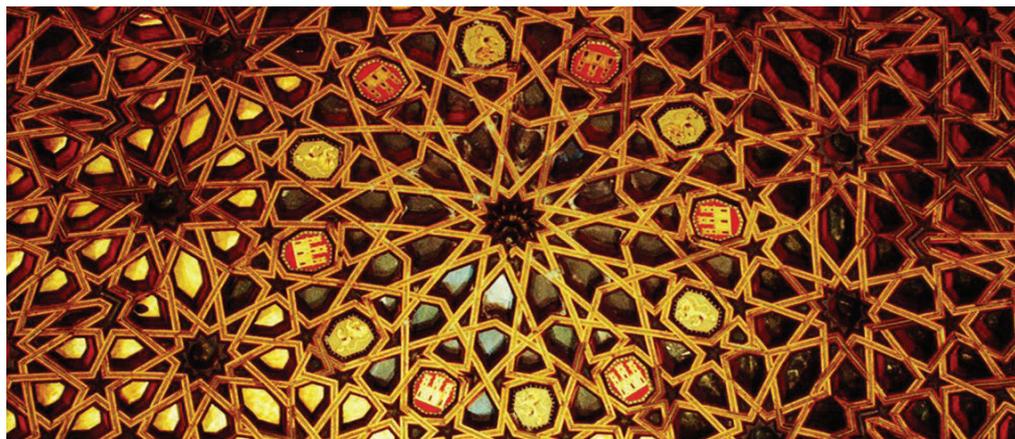
1859. P. C. Espinosa. Manual de construcciones de albañilería
1876. E. Mariátegui. Glosario de Arquitectura y de sus artes auxiliares
1879. R. Marcos y Bausá. Manual del albañil
1887. J. Adeline. Vocabulario de términos de Arte
1898. F. Ger y Lóbez. Tratado de construcción civil
1899. L. Gaztelu. Carpintería de armar
1915. F. Ger y Lóbez. Tratado de construcción civil (2a. ed.)
1927. E. Barberot. Tratado práctico de edificación
- 1830, 1835. C. Dupin. Geometría y mecánica de las artes y oficios
1840. J. Planella y Coromina. Arte de la perspectiva
1841. C. del. Piélago. Arquitectura hidráulica
1848. J. Millington. Elementos de arquitectura. Tomo I
1858. M. de. Fontenay. Manual de construcciones rústicas
1864. M. Miquel y Lucuy. Lecciones de corte de piedras
1870. N. Valdés. Manual del ingeniero y arquitecto
1875. J. Rebolledo. Construcción general
1877. B. Portuondo. Lecciones de arquitectura
- 1879. M. García López. Manual del carpintero y ebanista**
1884. A. Sánchez Pérez. Manual del cantero y marmolista
1885. M. Pardo. Materiales de construcción
1890. E. Plá y Rave. Tratado de maderas de construcción
- 1890ca. F. Nacente. El constructor moderno
- 1893, 1895. Arias y Scala. Carpintería antigua y moderna**
- 1897, 1899. A. Rovira y Rabassa. Estereotomía de la piedra
1900. A. Rovira y Rabassa. El hierro sus cortes y enlaces
- 1900. A. Rovira y Rabassa. La madera y su estereotomía**

En España, al igual que en otras regiones de Europa, estos tratados sirvieron durante décadas a los maestros constructores, y la experiencia hizo que fueran desarrollarse uniones y tipologías estructurales dando respuesta a cada

Figura 4.38

Detalle de uno de los
artesonados en el Salón de
Embajadores de los Reales
Alcázares de Sevilla

(Fuente: www.taujel.com)



caso concreto. Muchos de esos ejemplos, gracias a que las teorías y labores de restauración y rehabilitación llegaron a tiempo, se han conservado hasta nuestros días. La Figura 4.38 muestra un espléndido ejemplo de la arquitectura mudéjar, conservado en los Reales Alcázares de Sevilla. Enrique Nuere, es un estudioso de esta “carpintería de lazo” y sus aportaciones han sido muchas y muy decisivas para la buena conservación de estos tesoros mudéjares.

Figura 4.39

Pórtico de la Basílica de Santa
María de Uribarri en Durango
(Bizkaia)



Volviendo a la madera como material estructural, en la Figura 4.39 se muestra un ejemplo del porte que puede tener una estructura y de la especialización de cada uno de los elementos que los forman. El ejemplo es la estructura de madera de roble formando el atrio de la Basílica de Santa María de Uribarri en Durango, que ostenta la categoría de Monumento Nacional y es uno de los grandes monumentos del País Vasco. Más que atrio o pórtico puede considerarse una plaza cubierta en el centro de villa. Siendo construido entre 1679-1680 bajo las trazas de los maestros Baraincua y Gabiria, es un espléndido ejemplo de la carpintería popular que ha llegado hasta nuestros días y que merece ser conservado. No siendo su intención principal la belleza, sino la de cubrir un gran espacio donde pudiera celebrarse un mercado, la realidad es

que resulta un ejercicio espectacular de la arquitectura tradicional en madera.

Este es un ejemplo, como otros tantos, que se conservan en la Comunidad Autónoma Vasca, cuya tradición en la construcción de madera ha sido bien fructífera. Es posible que la industria naval, y la existencia de carpinteros de rivera en nuestras costas, hubieran influido también en la forma de trabajar la madera y, en consecuencia, de hacer arquitectura. Ejemplo de esa posible conexión es San Martín de Tours en Urretxu (Gipuzkoa). Sus espectaculares bóvedas formadas con tablillas de madera recuerdan a los cascos de los barcos (Figura 4.40).



Figura 4.40

A la izquierda, vista de las bóvedas de San Martín de Tours en Urretxu (Fuente: www.urolagaraia.com).

A la derecha, reproducción de la Nao San Juan en Pasajes de San Pedro, ejecutándose en Albaola (Fuente: www.albaola.com /Fotógrafa: Mendi Urruzuno)

Sin embargo, como es bien sabido, la madera es un material susceptible de ataques diversos por su condición de materia orgánica. La madera no sufre una degradación inherente a su estructura interna ni al paso del tiempo en sí, sino que se debe a la acción de agentes exteriores como la exposición a la climatología, los agentes xilófagos o los incendios (Liotta 2000). Estas realidades dieron lugar a cierta desconfianza en el material, olvidando el servicio innegable que había dado la madera durante siglos, dejándolo de lado. Por otra parte, a partir del siglo XVIII, la atractiva aparición de otros materiales de altas prestaciones, aceros y hormigones mayoritariamente, fue definitiva para relegar el uso de la madera a un segundo plano, llegando en algunos casos al abandono definitivo.

De todos modos, estamos ante un periodo de resurgir de la madera motivado por varios factores. En los últimos años ha crecido significativamente el interés por la conservación del patrimonio construido y en relación, por las estructuras históricas y por las teorías de restauración (Carta de Venecia 1964) reconociendo que la madera es un material de gran valor histórico cuyo uso ha sido generalizado durante mucho tiempo y que merece la pena revalorizar y conservar (Nuere 2007, Basterra, Casado et al. 2005). En la reparación de elementos estructurales de madera, hace no tantos años, se optaba por la sustitución con elementos de acero u hormigón, pero hoy en día se opta por la madera como material de sustitución, si es que hiciera falta una sustitución.

Además de la tendencia a la conservación de las estructuras de madera del Patrimonio, el hecho de que la madera sea el único material constructivo

realmente ecológico, ha impulsado mucho su valor dando viabilidad a proyectos sostenibles. Sus posibilidades reutilización y reciclado después del uso estructural, la poca energía necesaria para su transformación y la capacidad de almacenar CO₂, son algunas de las ventajas que aporta la madera en comparación con otros materiales desde el punto de vista de la ecología. Pero además, se trata de un material cálido y agradable y que tiene altas prestaciones térmicas y acústicas para su uso doméstico en los edificios contemporáneos.

4.2.2 La madera estructural y sus particularidades

En cuanto a la aplicación estructural de la madera, se puede decir que es un material de gran eficacia mecánica en lo que a su capacidad portante se refiere. La relación entre capacidad mecánica o portante y su baja densidad, hacen de la madera un material rentable, manejable y muy competitivo. Cuenta con la ventaja de poder trabajar correctamente tanto a compresión como a tracción, sobre todo en su dirección longitudinal, la paralela a las fibras de la madera. Es además un material ideal para soportar esfuerzos a flexión, que comprende tracción y compresión. Por eso durante mucho tiempo fue el único material capaz de solventar situaciones horizontales en arquitectura, sobre todo forjados y cubiertas.

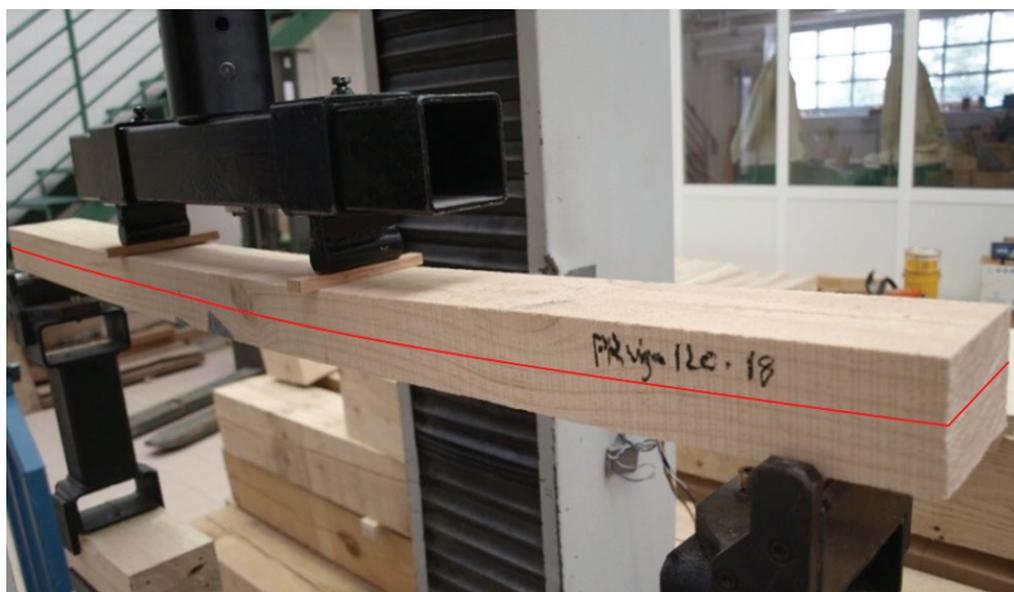


Figura 4.41

Viga sometida a flexión. Compresión de las fibras por encima de la fibra neutra y tracción de las fibras por debajo. La línea roja simula la fibra neutra en esa sección.

Por ejemplo, una viga sometida a flexión, trabaja a compresión por encima de la línea neutra y tracción por debajo de esa línea (Figura 4.41). Se denomina línea o fibra neutra a aquella que separa la parte comprimida de la parte traccionada en una pieza curva o sometida a flexión. La fibra neutra permanece inalterable desde el punto de vista de la deformación y su localización depende de la geometría de la sección transversal de la pieza.

En un inicio, tratando de caracterizar las diferentes especies de coníferas, lo habitual era realizar ensayos en probetas pequeñas, cuyas secciones

transversales eran de 20 mm x 20 mm y 300 mm de longitud, (Vignote, Peraza et al. 1985). Estos ensayos establecían las características físicas y mecánicas de las distintas maderas a nivel normativo (normas europeas y americanas), siendo precursores de una nueva visión de la madera como material de construcción.

Sin embargo, esos ensayos poco tenían que ver con la realidad. La madera estructural comprende piezas de grandes escuadrías, del orden de 150 mm x 200 mm, o por lo menos un ancho mayor de 70 mm, en las que aparecen numerosos “defectos”. Esos defectos no son tal, sino particularidades propias de las piezas de escuadría gruesa donde son inevitables nudos, gemas, fendas, desviaciones de la fibra y demás características propias del crecimiento del árbol. Además la médula y la madera de albura, la madera más nueva, siempre están presentes en piezas de grandes escuadrías, cosa que no ocurría en las probetas pequeñas y libres de defectos. Por eso, la tendencia actual es la de estudiar e investigar piezas de madera cuyas dimensiones sean propiamente estructurales y comerciales (Arriaga, Íñiguez et al. 2007). De hecho, a este formato se le denomina así, tamaño estructural o tamaño comercial. Las piezas clasificadas para uso estructural, han sido clasificadas para ese uso y no otro. Por lo que no deben relacionarse otro tipo de clasificaciones. La normativa a la que se hace referencia en el desarrollo de esta Tesis Doctoral abarca únicamente la madera para uso estructural en arquitectura.

Para referirse a las propiedades mecánicas en madera estructural se suelen dar los valores característicos, que son seguros con un 95 % de probabilidad, y son los que se emplean, por ejemplo, para comprobar la resistencia. Los valores medios son seguros con una probabilidad del 50 %, siendo utilizados para comprobar la densidad. En Europa, los ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas se realizan de acuerdo con la Norma UNE-EN 408, el procedimiento de estimación de los valores característicos de acuerdo con la Norma UNE-EN 384 y la clasificación visual de acuerdo con la Norma marco UNE-EN 14081-1 (Arriaga, Íñiguez et al. 2007). Los valores característicos de las propiedades mecánicas que se obtienen para cada calidad quedan asignados en un sistema de clases resistentes definido en la Norma UNE-EN 338 con el fin de simplificar el manejo de la gran diversidad que supondría considerar las combinaciones de especie, procedencia y calidad.

A continuación se recogen las características más significativas que pueden influir en las propiedades mecánicas de la madera aserrada de tamaño estructural:

- Contenido de nudos, gemas y fendas de secado
- Presencia de la médula y de madera juvenil
- Defectos internos ocultos
- Elevada humedad relativa

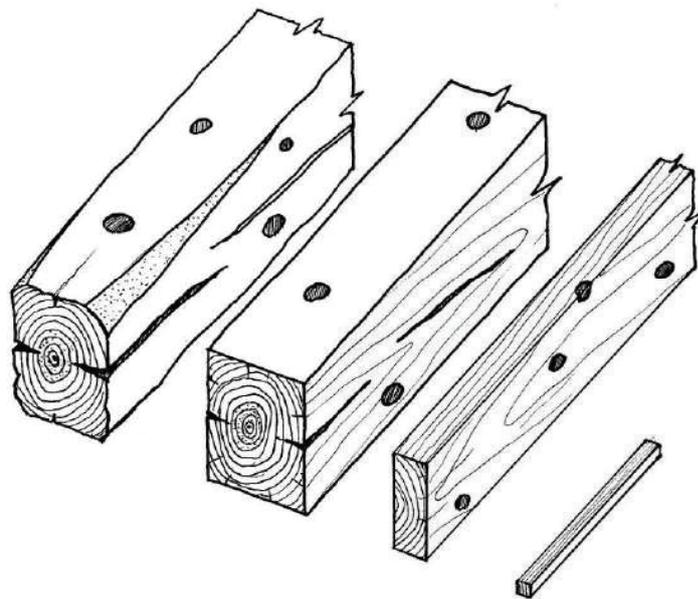


Figura 4.42

Influencia del tamaño en la aparición de singularidades (Arriaga, Íñiguez et al. 2007)

Siempre que se hable de estructuras de madera hay que hacer referencia al tamaño de las piezas utilizadas (Figura 4.42). Existe una influencia, comprobada, del efecto del tamaño, o mejor dicho, de la sección transversal de las piezas en las propiedades mecánicas de un elemento estructural.

Otra razón por la que hay que tener en cuenta el tamaño de la escuadría es que, si aplicaran los mismos criterios que para la clasificación visual que en las piezas pequeñas, habría una gran proporción de madera de rechazo. Funcionalmente o mecánicamente, esa madera de gran escuadría, es eficaz para su aplicación estructural pero, lógicamente, su contenido de nudos, fendas, gemas y otras particularidades, que sirven como criterio para clasificar una pieza como se verá más adelante, es mucho mayor que una pieza pequeña. Librarse de “defectos” en un “palito” es más fácil que en una viga de tamaño estructural.

4.2.3 Propiedades elástico-mecánicas de la madera

Para poder utilizar la madera en estructuras es necesario conocer y determinar sus propiedades físicas, elásticas y mecánicas. Como ya se va intuyendo por el carácter anisotrópico del material, el comportamiento elástico-mecánico de la madera está estrechamente relacionado con su composición anatómica. Haciendo hincapié en un símil, puede entenderse la madera como un haz de tubos huecos unidos entre sí, orientados y diseñados para soportar esfuerzos en la dirección paralela al eje del tronco. En la dirección perpendicular el comportamiento es bien diferente y su capacidad resistente, en general, mucho más baja. Este hecho es lo que diferencia a la madera de otros materiales de construcción.

Propiedades resistentes

En comparación con otros materiales, la madera es un material estructural muy eficaz, siendo capaz de soportar distintos esfuerzos. Destacan su buena

resistencia a flexión, a tracción y a compresión siempre que sean paralelas a la fibra. Habitualmente, los elementos estructurales de madera soportan tensiones paralelas a esa dirección, habiendo sido diseñados específicamente. En comparación con otros materiales habitualmente utilizados en las estructuras (hormigón armado HA25 y acero S275, la madera hace distinción entre la dirección a la que se hace referencia mientras que en estos otros no, por tener comportamientos isotrópicos.

Tabla 4.5

Comparación de las resistencias de cálculo y módulos de elasticidad en N/mm² de la madera, hormigón y acero

| | Flexión | Tracción | | Compresión | | Cortante | Módulo Elástico medio | |
|---------------|---------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------|-----------------------|--|
| | | Paral. ^(a) | Perp. ^(b) | Paral. ^(a) | Perp. ^(b) | | Paral. ^(a) | Perp. ^(b) |
| Madera C24 | 24 | 14 | 0,4 | 21 | 2,5 | 4 | 11000 | 370 ($E_{\text{paral}}^{(a)}/30$) |
| Hormigón HA25 | - | 1,8 | | 25 | | 0,6 | 27000 | |
| Acero S275 | 275 | | 170 | | 170 | | 210000 | |

^(a)Dirección paralela a las fibras en la madera

^(b)Dirección perpendicular a las fibras en la madera

En la Tabla 4.5 se han resumido las tensiones admisibles en tres materiales habitualmente empleados en construcción. Los valores introducidos en esa tabla, representan los valores de característicos, es decir, sin aplicar los coeficientes parciales de seguridad. A continuación se detallan algunas características de los tres materiales comparados en la Tabla 4.5:

Madera C24. Se refiere a madera procedente de conífera (código C) cuya resistencia a flexión característica (sin aplicar coeficientes) es de 24 N/mm², por eso el número 24. En la Tabla 4.8, sobre Clases Resistentes, pueden consultarse los valores característicos de las distintas propiedades de resistencia, las de rigidez y la densidad. La clase resistente C24 es muy habitual en los elementos estructurales de madera.

Hormigón HA25. Se refiere al Hormigón Armado (HA), cuya resistencia característica a compresión a los 28 días es de 25 N/mm²

Acero S275. Es otro material muy utilizado en construcción. La la S designa el acero estructural (*structural steel*) y el número se establece en función de las características mecánicas, indicando el valor mínimo del límite elástico, 275 N/mm²

Se ha comprobado que la madera puede ser comparada con otros materiales utilizados en estructuras, siendo sus propiedades mecánicas aptas para resolver distintas situaciones estructurales mediante distintos elementos portantes. A continuación se enumeran y detallan algunas de las características resistentes fundamentales de la madera aserrada estructural. Los valores han sido tomados de la Tabla 4.8, según la Norma UNE-EN 338 para coníferas:

a. Flexión

Resistencia muy alta

Valores: Sus valores característicos para las especies de coníferas, que se utilizan en estructuras, varían entre 14 y 50 N/mm², según su clase resistente. La madera procedente de coníferas se clasifica según su valor característico de resistencia a flexión, como se muestra en la Tabla 0.8, siendo las clases más habituales entre la C14 y la C30. Resistencias mayores son difícilmente alcanzables (de la C35 a la C50), aunque la normativa vigente las contempla (UNE-EN 338).

Elementos portantes: vigas y viguetas

b. Tracción paralela a la fibra

Resistencia muy alta

Valores: Los valores característicos oscilan entre 8 y 30 N/mm² (C14-C50)

Elementos portantes: Tirantes y pendolones de las cerchas

c. Compresión paralela a la fibra

Resistencia muy alta

Valores: Valores característicos en la madera clasificada varían entre 16 y 29 N/mm² (C14-C50)

Elementos portantes: pilares, postes, pies derechos, montantes de muros entramados, pares de cubierta, etc.

En el cálculo de los elementos comprimidos es preciso realizar una comprobación de la inestabilidad de la pieza (por pandeo), sobre el que influye decisivamente el módulo de elasticidad. El valor relativamente bajo de este módulo reduce, en la práctica, la resistencia a la compresión de piezas esbeltas.

El resto de las propiedades resistentes no son tan altas y pueden dar lugar a problemas en el funcionamiento de la estructura. Como se ha mencionado con anterioridad, la madera ha sido diseñada por la Naturaleza para soportar ciertas acciones, y las que se mencionan a continuación no corresponden a la forma natural de comportamiento del material.

d. Tracción perpendicular a la fibra

Resistencia muy baja. La resistencia a la tracción perpendicular a las fibras es del orden de 30 a 70 veces menor que en la dirección paralela.

Valores: Su valor característico es de 0,4 N/mm² (Tabla 4.8)

No existen ejemplos porque no hay piezas características sometidas a esta sollicitación, a no ser que el elemento accidentalmente haya cambiado su función estructural.

e. Compresión perpendicular a la fibra

Resistencia baja

Valores: Su valor característico es de 2,0 a 3,2 N/mm² (Tabla 4.8)

Este tipo de esfuerzo es característico de las zonas de apoyo de las vigas. Las cabezas de las vigas o las uniones con los pilares pueden sufrir deformaciones importantes por aplastamiento o “punzonamiento”.

f. Cortante

Resistencia baja. Origina tensiones tangenciales que actúan sobre las fibras de la madera según diversos modos:

Tensiones tangenciales de cortadura: Las fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo.

Tensiones tangenciales de deslizamiento: El fallo se produce por el deslizamiento de unas fibras con respecto a otras en la dirección longitudinal.

Tensiones tangenciales de rodadura: El fallo se produce por rodadura de unas fibras sobre las otras. En las piezas sometidas a flexión y a cortante, las tensiones que intervienen son conjuntamente las de cortadura y deslizamiento.

Valores: Su valor característico es de 3,0 a 4,0 N/mm² (Tabla 4.8)

Elementos portantes: Vigas de poca luz y gran canto y vigas de doble T.

Propiedades de rigidez

A continuación se analizan los valores característicos de las propiedades de rigidez, o cómo de elástico es un material. De otro modo, se puede explicar como la resistencia que presentan los materiales, en este caso la madera, a las deformaciones. Si se transporta a los elementos estructurales, la rigidez hace referencia a la capacidad de soportar esfuerzos sin deformarse.

a. Módulo de elasticidad

La madera tiene varios módulos de elasticidad, por su naturaleza anisotrópica, en función de la dirección en la que se mida.

Valores:

Módulo elástico paralelo a la fibra: Su valor varía entre 7 y 16 kN/mm² (Tabla 4.8), siendo habitual ver sus valores medidos en megapascasles, entre 7000

MPa y 16000 MPa.

Módulo elástico perpendicular a la fibra: Su valor es aproximadamente 30 veces inferior al paralelo a la fibra, $E_{\text{paralelo}}/E_{\text{perpendicular}} = 30$. Sus valores varían entre 0,23 y 0,53 kN/mm², en megapascales, entre 230 y 530 MPa (Tabla 4.8).

b. Módulo de cortante

En la madera también existe un módulo de cortante ligado a los esfuerzos cortantes.

Valores: Su valor es alrededor de 16 veces inferior al módulo de elasticidad paralelo a la fibra, $E_{\text{paralelo}}/G=16$. Sus valores oscilan entre 0,44 y 1 kN/mm² (Tabla 4.8). En megapascales (MPa), entre 440 y 1000.

Densidad

La densidad de la madera está íntimamente relacionada con otras características y propiedades. En general puede decirse que la madera es más resistente y más rígida cuando más alta sea su densidad.

Según la Norma UNE-EN 338, las maderas de coníferas se mueven entre 350 y 550 kg/m³ (C14-C50). Como norma general, las de frondosas son más densas, variando sus valores entre 570 y 1080 kg/m³ (D18-D70). Si se habla de especies, destacar la madera de balsa (*Ochroma pyramidale*) entre las menos densas, unos 150 kg/m³, utilizada frecuentemente para hacer maquetas por su fácil manipulación y corte. En el extremo contrario está el lapacho (*Tabebuia*) o el ébano (*Diospyros crassifolia Hiern*) cuya densidad es mayor que la del agua, es decir más de 1000 kg/m³.

Existen muchas otras propiedades para definir un tipo de madera, como el color, el veteado o incluso el olor. Pero realmente las propiedades que se tienen en cuenta a nivel estructural, por lo tanto a nivel normativo, son de los tres tipos mencionados con anterioridad; propiedades de resistencia, propiedades de rigidez y la densidad.

En resumen, puede decirse que la madera es un material diseñado por la naturaleza para resistir con eficacia ciertos esfuerzos. Durante millones de años los árboles han ido especializándose para soportar los esfuerzos a los que son sometidos durante su vida, las acciones del viento y los efectos gravitatorios. Por lo tanto, carece de sentido utilizar la madera para hacer frente a esfuerzos para los que no ha sido diseñada.

A la hora de referirse a las propiedades elásticas y mecánicas de la madera, hay que hacer alusión también a la dirección en la que se refiere dicha propiedad. En la normativa se habla de los valores característicos de esas propiedades, que se refieren a aquellos valores que son seguros con un 95% de probabilidad (5º percentil). Los valores característicos se diferencian en la Norma por llevar

el subíndice k . Los valores medios, son seguros pero con una probabilidad del 50%. Estos se utilizan más habitualmente en las propiedades de rigidez, es decir, en los módulos de elasticidad, y en las densidades. Mientras que para referirse a las resistencias, se suelen aportar los valores característicos.

4.2.4 Normativa y regulación de las estructuras de madera

Además del creciente interés por la conservación de las estructuras históricas de madera y por su sostenibilidad medioambiental como material, que se han mencionado ya reiteradamente, cabe destacar la enorme contribución que ha supuesto el desarrollo de la normativa en el resurgir de la madera en el mundo de la arquitectura. La aplicación de la normativa ha hecho de la madera un material realmente competitivo y con las mismas garantías que el acero o el hormigón (Esteban, Argüelles et al. 2007).

Existía un gran desconocimiento acerca del comportamiento y de la resistencia de la madera hasta el desarrollo de la Ley de Ordenación de la Edificación (Gobierno de España 1999) y del Código Técnico de la Edificación en el año 2006 (CTE). El Documento Básico que hace referencia a la Seguridad Estructural en los elementos portantes de Madera (CTE.DB-SE-M), indica cuales son las clases resistentes que se pueden utilizar en construcción. El predecesor europeo para el cálculo de las estructuras de madera fue el Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995), titulado “Proyecto de estructuras de madera”, que era el único manual de referencia útil para el cálculo de estructuras de madera, y que está todavía vigente pero que no era de obligado cumplimiento. Este documento se divide en dos partes, la primera subtitulada “Reglas generales y reglas para edificación” y la segunda haciendo referencia a la acción del fuego en la madera, bajo el subtítulo “Reglas generales proyecto de estructuras sometidas al fuego”.

La publicación de normativa de referencia ha aportado el conocimiento técnico necesario acerca del comportamiento del material y ha proporcionado rigor y fiabilidad a su uso como material estructural. Hoy en día se ha ampliado exponencialmente tanto el conocimiento como las publicaciones acerca de las estructuras de madera (Esteban, Argüelles et al. 2007), tanto de las nuevas como de las existentes, aunque éstas últimas no deben seguir los mismos criterios que las nuevas (Nuere 2007).

El nivel de demanda de madera estructural en el mundo de la construcción es cada vez mayor, y exige sistemas de producción y de caracterización para conocer y garantizar sus propiedades mecánicas. La normativa actual existente se basa en los criterios de la clasificación visual para asignar una clase resistente, según lo establecido en Europa por los Comités Europeos de Normalización.

A continuación se indican las normativas fundamentales para la caracterización y prescripción de la madera estructural en la construcción (Tabla 4.6):

Tabla 4.6

Normativa actual sobre Madera Estructural para la construcción

| Código | Título de la Norma |
|--------------|--|
| UNE-ENV 1995 | Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego. |
| CTE.DB-SE-M | Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural. Madera |
| UNE-EN 1912 | Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. |
| UNE-EN 336 | Madera estructural. Dimensiones y tolerancias. |
| UNE-EN 338 | Madera estructural. Clases resistentes. |
| UNE-EN 384 | Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. |
| UNE-EN 408 | Madera aserrada y madera laminada en colada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. |
| UNE 56544 | Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas |
| UNE 56546 | Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas |

En los últimos años, AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación) ha añadido a la lista anterior las siguientes normas (Tabla 4.7), en las que se refiere a las estructuras de madera existentes y no solamente a las de nueva planta.

Tabla 4.7

Nueva normativa sobre estructuras de madera existentes

| Código | Título de la Norma |
|-----------|---|
| UNE 41808 | Estructuras de madera existentes. Sistema de representación gráfica del estado constructivo de las estructuras de madera existentes. (Año 2013) |
| UNE 41809 | Estructuras de madera existentes. Uso del penetrómetro para diagnóstico de los elementos de madera en edificios existentes. (Año 2014) |

Las normas que aquí se han mencionado son las que se han tenido en cuenta para la aproximación al contexto en el que se va a aplicar la técnica de Hole Drilling, las estructuras existentes construidas con madera aserrada. Sin embargo, la realidad es que cada día van saliendo a la luz nuevas normas acerca de los nuevos productos estructurales de madera, de los sistemas de unión y de los adhesivos. Además de que la normativa es cada vez más abundante, la tecnología de la madera se ha visto impulsada con la aparición de nuevas posibilidades de aplicación de la madera en forma de nuevos materiales

tecnológicos derivados de esta materia prima (Figura 4.43). Se pueden destacar, por su amplia utilización, la madera laminada y los tableros estructurales (CLT), cuyas prestaciones son altísimas y su prosperidad, inminente. Sin embargo, la normativa actual (CTE.DB-SE-M) no los recoge todos. A continuación se muestran y se mencionan algunos, pero sin llegar a profundizar ya que quedan fuera del alcance de esta Tesis Doctoral.

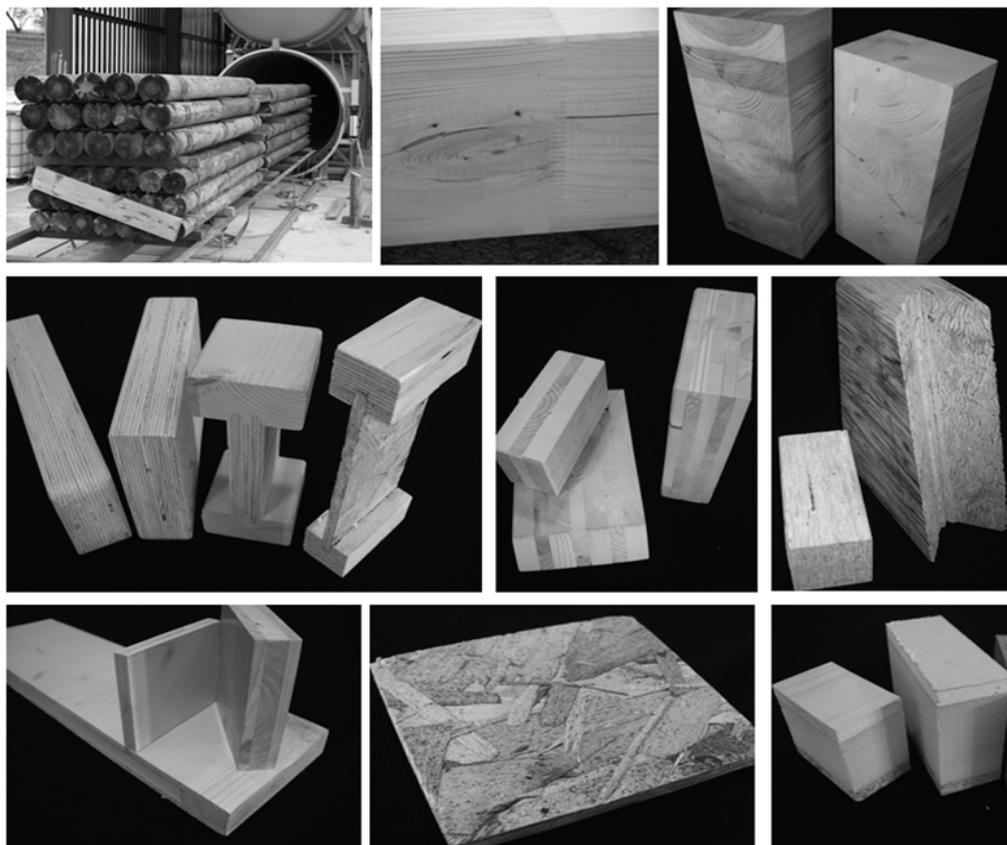


Figura 4.43
Productos estructurales
de madera
(Arriaga, Esteban et al. 2010)

- Madera en rollo estructural
- Madera aserrada estructural
- Madera empalmada estructural
- Madera aserrada encolada
- Madera laminada encolada
- Madera microlaminada
- Perfiles de madera reconstituida
- Paneles contralaminados
- Tableros estructurales o CLT
- Vigas mixtas prefabricadas
- Paneles sándwich de cerramiento
- Paneles sándwich portantes

Tabla 4.8

Madera aserrada. Especies de coníferas y chopo. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente (UNE-EN 338)

| Propiedades | | Clase Resistente [Coníferas y Chopo] | | | | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | C14 | C16 | C18 | C20 | C22 | C24 | C27 | C30 | C35 | C40 | C45 | C50 |
| Resistencia (N/mm²) | | | | | | | | | | | | | |
| Flexión | $f_{m,k}$ | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 27 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Tracción paralela a la fibra | $f_{t,0,k}$ | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 16 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 |
| Tracción perpendicular a la fibra | $f_{t,90,k}$ | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Compresión paralela a la fibra | $f_{c,0,k}$ | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 25 | 26 | 27 | 29 |
| Compresión perpendicular a la fibra | $f_{c,90,k}$ | 2,0 | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 |
| Cortante | $f_{v,k}$ | 3,0 | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,8 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| Rigidez (kN/mm²) | | | | | | | | | | | | | |
| Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra | $E_{0,medio}$ | 7 | 8 | 9 | 9,5 | 10 | 11 | 11,5 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Módulo de elasticidad paralelo a la fibra (5º percentil) | $E_{0,k}$ | 4,7 | 5,4 | 6,0 | 6,4 | 6,7 | 7,4 | 7,7 | 8,0 | 8,7 | 9,4 | 10,0 | 10,7 |
| Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra | $E_{90,medio}$ | 0,23 | 0,27 | 0,30 | 0,32 | 0,33 | 0,37 | 0,38 | 0,40 | 0,43 | 0,47 | 0,50 | 0,53 |
| Módulo medio de cortante | G_{medio} | 0,44 | 0,50 | 0,56 | 0,59 | 0,63 | 0,69 | 0,72 | 0,75 | 0,81 | 0,88 | 0,94 | 1,00 |
| Densidad (kg/m³) | | | | | | | | | | | | | |
| Densidad | ρ_k | 290 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 370 | 380 | 400 | 420 | 440 | 460 |
| Densidad media | ρ_{medio} | 350 | 370 | 380 | 390 | 410 | 420 | 450 | 460 | 480 | 500 | 520 | 550 |

Tabla 4.9

Madera aserrada. Especies frondosas. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente (UNE-EN 338)

| Propiedades | | Clase Resistente [Frondosas] | | | | | | | |
|--|----------------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | D18 | D24 | D30 | D35 | D40 | D50 | D60 | D70 |
| Resistencia (N/mm²) | | | | | | | | | |
| Flexión | $f_{m,k}$ | 18 | 24 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| Tracción paralela a la fibra | $f_{t,0,k}$ | 11 | 14 | 18 | 21 | 24 | 30 | 36 | 42 |
| Tracción perpendicular a la fibra | $f_{t,90,k}$ | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Compresión paralela a la fibra | $f_{c,0,k}$ | 18 | 21 | 23 | 25 | 26 | 29 | 32 | 34 |
| Compresión perpendicular a la fibra | $f_{c,90,k}$ | 7,5 | 7,8 | 8,0 | 8,1 | 8,3 | 9,3 | 10,5 | 13,5 |
| Cortante | $f_{v,k}$ | 3,4 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
| Rigidez (kN/mm²) | | | | | | | | | |
| Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra | $E_{0,medio}$ | 9,5 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 17 | 20 |
| Módulo de elasticidad paralelo a la fibra (5º percentil) | $E_{0,k}$ | 8 | 8,5 | 9,2 | 10,1 | 10,9 | 11,8 | 14,3 | 16,8 |
| Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra | $E_{90,medio}$ | 0,63 | 0,67 | 0,73 | 0,80 | 0,86 | 0,93 | 1,13 | 1,33 |
| Módulo medio de cortante | G_{medio} | 0,59 | 0,62 | 0,69 | 0,75 | 0,81 | 0,88 | 1,06 | 1,25 |
| Densidad (kg/m³) | | | | | | | | | |
| Densidad | ρ_k | 475 | 485 | 530 | 540 | 550 | 620 | 700 | 900 |
| Densidad media | ρ_{medio} | 570 | 580 | 640 | 650 | 660 | 750 | 840 | 1080 |

Esta Tesis Doctoral se referirá siempre a la madera maciza, y concretamente a la aserrada (no en rollizo). Para poder definir las distintas calidades de la madera aserrada, a nivel europeo, se optó por un sistema de clasificación según las diversas resistencias características. Se agrupan calidades y especies con resistencias similares, por un lado coníferas y chopo y por otro, frondosas. La Tabla 4.8 muestra los valores de las propiedades de la madera de conífera y chopo, identificadas con la letra C (*Coniferous*). La Tabla 4.9, análogamente, muestra los valores propios de las especies de frondosas, identificándose mediante la letra D, de *Deciduous*, en inglés. En ambas tables, la identificación de la clase se realiza mediante un código numérico, aludiendo a la resistencia característica a flexión ($f_{m,k}$) de cada una, expresada en N/mm² o, lo que es lo mismo, en MPa.

Antes de continuar, la Norma UNE-EN 338 puntualiza que los valores dados en estas tablas (Tabla 4.8 y Tabla 4.9) para la resistencia a tracción, resistencia a compresión, resistencia a cortante, 5º percentil del módulo de elasticidad, módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra y módulo de cortante no se han medido experimentalmente, sino que se han calculado utilizando las ecuaciones dadas en el Anexo A de la misma Norma. Las propiedades relacionadas en estas tablas son aplicables a la madera que presente un contenido de humedad que corresponda a una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 65%. La madera de conífera perteneciente a las clases C45 y C50 no es fácilmente disponible.

Además de la clase resistente, cuando se habla de madera estructural hay que hacer referencia también a la calidad. Calidad hace referencia al contenido de nudos, fendas y demás singularidades propias del crecimiento del árbol y que son muy variables. En España, para coníferas y chopo, se establecen dos calidades principales ME-1 y ME-2, donde las siglas ME significan Madera Estructural (Tabla 4.10). De este modo que la madera que queda fuera de esas dos categorías no se considera estructural y, en consecuencia, se rechaza o se destina a otros usos.

Se están produciendo avances, pero aun no se ha caracterizado totalmente la Madera Estructural Gruesa (denominada MEG), que se refiere a piezas cuyo ancho (dimensión denominada b , frente a la h que se refiere a la altura de la sección) sea mayor de 70 mm, condición que se da muy habitualmente en arquitectura y para la que los criterios de calidad visual deben ser algo más laxos (Figura 4.40 y Tabla 4.11). Sin embargo, solamente se contemplan dentro de esta clasificación el pino silvestre y el pino laricio. La de pino radiata, aunque ya ha sido ensayada por el INIA, todavía está pendiente de publicación a nivel normativo. Se prevé una clase C22, según el Informe del desarrollo del proyecto sobre Caracterización mecánica de vigas de Gruesa Escuadría de pino radiata del País Vasco desarrollado por la MIME (Mesa Intersectorial de la Madera en Euskadi) (www.mesamadera.com), que concluye textualmente así: “Los datos obtenidos ponen en evidencia que la madera de pino radiata de gruesa escuadría constituye un material de propiedades mecánicas (C22) muy apropiadas para el trabajo estructural, que puede ser clasificado visualmente con éxito mediante la Norma UNE 56544 y evaluado de forma fiable mediante la aplicación de diferentes métodos no destructivos existentes en el mercado.”

Es decir, que para clasificar la madera, además de a las propiedades elástico-mecánicas vistas en las Tabla 4.8 y Tabla 4.9, hay que prestar atención a la presencia de particularidades en las piezas, ya que determinan la calidad de la misma. Esas particularidades, que en la Norma se reflejan como criterios de calidad, y son las siguientes:

- Nudos
- Inclinación de las fibras
- Entrecasco
- Bolsas de resina
- Fendas
- Acebolladuras
- Gemas
- Ataques bióticos
- Dimensiones de la pieza
- Contenido de humedad

Para determinar la clase de calidad (ME-1 o ME-2) a la que pertenece un elemento estructural aserrado se somete a una clasificación visual según dicta la Norma UNE 56544 para coníferas (Tabla 4.10).

Tabla 4.10

Especificaciones para la clasificación de piezas de madera de coníferas españolas de sección rectangular, con anchura $b \leq 70$ mm (UNE 56544)

| Criterios de calidad | | ME-1 | ME-2 |
|---|--|---|--|
| Diámetro de los nudos sobre cara (h) | | $d \leq 1/5$ de " h " | $d \leq 1/2$ de " h " |
| Diámetro de los nudos sobre el canto (b) | | $d \leq 1/2$ de " b " y $d \leq 30$ mm | $d \leq 2/3$ de " b " |
| Anchura máxima del anillo de crecimiento ⁽¹⁾ | Pino silvestre | ≤ 4 mm | Sin limitación |
| | Pino laricio | ≤ 5 mm | |
| | Pino pinaster | ≤ 8 mm | |
| | Pino radiata | ≤ 10 mm | |
| Fendas | De secado ^(2,3) | $f \leq 2/5$ | $f \leq 3/5$ |
| | Rayo, heladura y abatimiento | No permitidas | |
| Acebolladuras | | No permitidas | |
| Bolsas de resina y entrecasco | | Se admiten si su longitud es menor o igual que $1,5$ " h " | |
| Madera de compresión | | Admisible en $1/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza | Admisible en $2/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza |
| Desviación de la fibra | | 1:10 (10%) | 1:6(16,7%) |
| Gemas | Longitud | $\leq 1/4$ de " L " | $\leq 1/3$ de " L " |
| | Dimensión relativa | $g \leq 1/4$ | $g \leq 1/3$ |
| Médula ⁽¹⁾ | | Admitida No admitida si se clasifica en húmedo | Admitida |
| Alteraciones biológicas | Muérdago (<i>V. album</i>), pudrición y galerías de insectos xilófagos | No se admiten | |
| | Azulado | Se admite | |
| Deformaciones máximas ^(2,3,4) | Curvatura de cara | 10 mm (para 2m de longitud) | 20 mm (para 2 m de longitud) |
| | Curvatura de canto | 8 mm (para 2 m de longitud) | 12 mm (para 2 m de longitud) |
| | Alabeo | 1 mm (por cada 25 mm de " h ") (para una longitud de 2m) es decir \leq " h "/25 | 2 mm (por cada 25 mm de " h ") (para una longitud de 2m) es decir ≤ 2 " h "/25) |
| | Abarquillado | Sin limitación | Sin limitación |

(1) Estos criterios solo se consideran cuando se comercializa en húmedo.

(2) Estos criterios no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.

(3) Referidas a un 20% de humedad.

(4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (por que puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista un acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.

Para los elementos estructurales cuyas dimensiones transversales son más grandes, y que cumplan la condición de que en ancho de la sección transversal sea mayor de 70 mm ($b > 70$ mm), como ocurre a menudo en ejemplares que componen las estructuras históricas, la clasificación visual establece condiciones algo menos exigentes como muestra la siguiente Tabla 4.11.

Tabla 4.11

Especificaciones para la clasificación visual de piezas de madera de coníferas españolas de sección rectangular con anchura $b > 70$ mm (UNE 56544)

| Criterios de calidad | | MEG |
|---|--|--|
| Diámetro de los nudos sobre cara (h) | | $d \leq 2/3$ de " h " |
| Diámetro de los nudos sobre canto (b) | | $d \leq 2/3$ de " b " |
| Anchura máxima del anillo de crecimiento ⁽¹⁾ | Pino silvestre | Sin limitación |
| | Pino laricio | |
| | Pino gallego y pinaster | |
| | Pino insigne (radiata) | |
| Fendas | De secado ^(2,3) | f (profundidad) $\leq 3/5$ Las fendas de secado solo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las siguientes dimensiones: 1/4 de la longitud de la pieza (L) y 1 metro |
| | Rayo, heladura y abatimiento | No permitidas |
| Acebolladuras | | No permitidas |
| Bolsas de resina y entrecasco | | Se admiten si su longitud es menor o igual que 1,5 " 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>), pudrición y galerías de insectos xilófagos | No se admiten |
| | Azulado | Se admite |
| 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 2m) |
| | Abarquillado | Sin limitación |

(1) Estos criterios solo se consideran cuando se comercializa en húmedo.

(2) Estos criterios no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.

(3) Referidas a un 20% de humedad.

(4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (por que puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista un acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.

(5) Se toman los valores más exigentes indicados entre paréntesis, cuando la calidad MEG de lugar a una clase resistente superior a C18.

El objetivo de esta clasificación visual en España es el de establecer un criterio de calidades entre madera estructural “buena”, madera estructural de menor calidad y la madera de rechazo, o madera que no sirve para la construcción de estructuras.

En la actualidad se han caracterizado cuatro especies de coníferas y se han relacionado con las clases resistentes según la clasificación visual. Entre las frondosas, solamente se ha caracterizado a nivel normativo dos especies, el eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill.*) y el castaño (*Castanea sativa Mill.*). Se puede decir que estas normas están en constante desarrollo según se van realizando ensayos en diferentes especies y se va aumentando el número de la muestra ensayada.

La clasificación visual es análoga para la madera proveniente de frondosas, es decir que se rige por los mismos criterios de calidad. Sin embargo, mientras que las distintas especies coníferas se ajustan a los mismos criterios de calidad, la norma de clasificación visual para frondosas (UNE 56546) ofrece distintos valores de calidad para cada una de las especies caracterizadas, por una lado el eucalipto (Tabla 4.12) y por otro lado, y de más recientemente en la Norma, el castaño. De esta última especie se han distinguido dos calidades, la madera estructura de frondosa (Tabla 4.13) y la madera estructural de frondosa gruesa (Tabla 4.14).

Tabla 4.12

Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular de madera de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.)
($b \leq 60\text{mm}$ y $h \leq 200\text{mm}$)
(UNE 56546)

| Criterios de calidad | | MEF | |
|---|------------------------------|--|---|
| Diámetro de los nudos sobre cara (d/h) | | $d \leq 1/3$ de " h " | |
| Diámetro de los nudos sobre canto (d/b) | | $d \leq 1/2$ de " b " | |
| Fendas | De secado ^(1,2) | Fendas pasantes de testa | L (longitud) \leq " h " |
| | | Resto | F (profundidad) $\leq 1/2$ de " b " |
| | Rayo, heladura y abatimiento | No permitidas | |
| Acebolladuras | | No permitidas | |
| Madera de tracción | | Admisible en $1/5$ de la sección o $1/5$ de la superficie externa de la pieza | |
| Desviación de la fibra | | 1:10 (10%) | |
| Gemas | Longitud | $\leq 1/4$ de " L " | |
| | Anchura y espesor | $g \leq 1/4$ | |
| Médula | | No permitida | |
| Alteraciones biológicas | Pudrición | No se admite | |
| | Insectos xilófagos | No se admiten ataques activos. En caso de ataques inactivos, se admiten orificios aislados de hasta 2 mm de diámetro | |
| Deformaciones máximas ^(1,3) | Curvatura de cara | 10 mm (para una longitud de 2 m) | |
| | Curvatura de canto | 8 mm (para una longitud de 2 m) | |
| | Alabeo | 1 mm (por cada 25 mm de " h ") (para una longitud de 2m) | |
| | Abarquillado | $1/25$ de " h " | |

(1) Estos criterios no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.

(2) Referidas a un 20% de contenido de humedad. No se tienen en cuenta aquellas fendas que tengan una longitud inferior a la menor dimensión de las dos siguientes: $1/4$ de longitud de la pieza y 1m.

(3) Referidas a un 20% de contenido de humedad. Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.

Tabla 4.13

Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular de madera de castaño (*Castanea sativa Mill.*) de pequeña escuadría ($b \leq 70\text{mm}$) (UNE 56546)

| Criterios de calidad | | MEF |
|--|--|--|
| Diámetro de los nudos sobre cara (d/h) | | $d \leq 1/2$ de " h " |
| Diámetro de los nudos sobre canto (d/b) | | $d \leq 2/3$ de " b " |
| Fendas | De secado ^(1,2) Pasantes de testa | L (longitud) ≤ 2 " h " |
| | Resto | F (profundidad) $\leq 1/2$ " b " |
| Rayo, heladura y abatimiento | | No permitidas |
| Acebolladuras ⁽³⁾ | | Permitidas con limitaciones |
| Madera de tracción | | Admisible en $1/5$ de la sección o $1/5$ de la superficie externa de la pieza |
| Desviación de la fibra | | 1:10 (10%) |
| Gemas | Longitud | $\leq 1/4$ de " L " |
| | Dimensión relativa | $g \leq 1/4$ |
| Médula | | Permitida |
| Anchura máxima de los anillos de crecimiento | | Sin limitación |
| Alteraciones biológicas | Pudriciones | No admitidas |
| | Insectos xilófagos | No se admiten ataques activos. En caso de ataques inactivos, se admiten orificios aislados de hasta 2 mm de diámetro |
| Coloraciones | | Se admite coloración rojiza/atabacado |
| Deformaciones máximas ^(1,4) | Curvatura de cara | 10 mm (para una longitud de 2 m) |
| | Curvatura de canto | 8 mm (para una longitud de 2 m) |
| | Alabeo | 1 mm (por cada 25 mm de " h ") (para una longitud de 2m) |
| | Abarquillado | Sin limitación |

(1) Estos criterios no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.

(2) Referidas a un 20% de contenido de humedad. No se tendrán en cuenta aquellas fendas que tengan una longitud inferior a la menor dimensión de las dos siguientes: $1/4$ de longitud de la pieza y 1m.

(3) Se admite si:

$$r_{\text{máx.}} < b/3 \text{ y } \epsilon < b/6$$

$r_{\text{máx.}}$ es el radio máxima de la acebolladura considerando la médula como centro de la circunferencia y ϵ es la excentricidad (distancia entre la médula y el centro de la sección)

(4) Referidas a un 20% de contenido de humedad. Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecte a la estabilidad de la construcción (porque pueda corregirse durante la fase de montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.

Tabla 4.14

Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular de madera de castaño (*Castanea sativa* Mill.) de gran escuadría ($b > 70\text{mm}$) (UNE56546)

| Criterios de calidad | | MEF-G |
|--|--|--|
| Diámetro de los nudos sobre cara (d/h) | | $d \leq 1/2$ de " h " |
| Diámetro de los nudos sobre canto (d/b) | | $d \leq 2/3$ de " b " |
| Fendas | De secado ^(1,2) Pasantes de testa | L (longitud) ≤ 2 " h " |
| | Resto | F (profundidad) $\leq 1/2$ " b " |
| Rayo, heladura y abatimiento | | No permitidas |
| Acebolladuras ⁽³⁾ | | Permitidas con limitaciones |
| Madera de tracción | | Admisible en $1/5$ de la sección o $1/5$ de la superficie externa de la pieza |
| Desviación de la fibra | | 1:6 (16,7%) |
| Gemas | Longitud | $\leq 1/2$ de " L " |
| | Dimensión relativa | $g \leq 1/4$ |
| Médula | | Permitida |
| Anchura máxima de los anillos de crecimiento | | Sin limitación |
| Alteraciones biológicas | Pudriciones | No admitidas |
| | Insectos xilófagos | No se admiten ataques activos. En caso de ataques inactivos, se admiten orificios aislados de hasta 2 mm de diámetro |
| Coloraciones | | Se admite coloración rojiza/atabacado |
| Deformaciones máximas ^(1,4) | Curvatura de cara | 20 mm (para una longitud de 2 m) |
| | Curvatura de canto | 12 mm (para una longitud de 2 m) |
| | Alabeo | 2 mm (por cada 25 mm de " h ") (para una longitud de 2m) |
| | Abarquillado | Sin limitación |

(1) Estos criterios no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.

(2) Referidas a un 20% de contenido de humedad. No se tendrán en cuenta aquellas fendas que tengan una longitud inferior a la menor dimensión de las dos siguientes: $1/4$ de longitud de la pieza y 1m.

(3) Se admite si:

$$r_{\text{máx.}} < b/3 \text{ y } \varepsilon < b/6$$

$r_{\text{máx}}$ es el radio máxima de la acebolladura considerando la médula como centro de la circunferencia y ε es la excentricidad (distancia entre la médula y el centro de la sección)

(4) Referidas a un 20% de contenido de humedad. Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecte a la estabilidad de la construcción (porque pueda corregirse durante la fase de montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.

La Tabla 4.15, que se muestra a continuación, resume las relaciones entre las especies de coníferas caracterizadas hasta el momento, según su calidad y sus valores resistentes característicos. En las cuatro especies se realizan distinciones entre la Madera Estructural de clase 1 (mejor) y la de clase 2 (peor). Pero solamente se han caracterizado, hasta el momento, el pino silvestre y el laricio para el caso de la madera estructural de escuadría gruesa. Los resultados obtenidos en la partida de ensayos realizados sobre piezas de tamaño estructural (MEG) en madera de pino radiata procedente de la

Comunidad Autónoma Vasca (www.mesamadera.com), presumiblemente, serán publicados a nivel normativo próximamente.

Tabla 4.15

Clases resistentes por especie y clases visuales para maderas de coníferas de procedencia española. (CTE.DB SE-M Tabla C.1.)

| Especies | Clase de calidad | | |
|---|------------------|------|---|
| | ME-1 | ME-2 | MEG |
| Pino radiata (<i>Pinus radiata</i> D.Don) | C24 | C18 | C22 (Pendiente de publicación en la Norma) |
| Pino pinaster (<i>Pinus pinaster</i> Ait.) | C24 | C18 | - |
| Pino silvestre (<i>Pinus silvestris</i> L.) | C27 | C18 | C22 |
| Pino laricio (<i>Pinus nigra</i> Arn. Var. <i>Salmannii</i>) | C30 | C18 | C22 |

En el caso de las frondosas, el eucalipto y el castaño, los resultados para establecer los valores característicos pueden resumirse en la siguiente Tabla 4.16:

Tabla 4.16

Valores característicos de las propiedades mecánicas obtenidas por ensayo de la madera de frondosas (UNE 56546)

| Propiedad | | Valor característico | | |
|---|----------------|----------------------|----------------|------------------|
| | | Eucalipto MEF | Castaño MEF | Castaño MEF-G |
| Resistencia característica a flexión (N/mm ²) | $f_{m,k}$ | 47 | 28,1 | 26,8 |
| Módulo elástico medio paralelo a la fibra (N/mm ²) | $E_{0,medio}$ | 13500 | 12290 | 10280 |
| Módulo elástico paralelo a la fibra 5 ^o percentil (N/mm ²) | $E_{0,k}$ | 13500 | 9320 | 8440 |
| Densidad media (kg/m ³) | ρ_k | 797 | 582 | 582 |
| Densidad 5 ^o percentil (kg/m ³) | ρ_{medio} | 672 | 510 | 500 |

La finalidad de cualquier norma es establecer un sistema de uso general, que indique los valores característicos de las propiedades de resistencia (f) y rigidez (E , G) y los valores de densidad (ρ). Es indispensable conocer los datos reglados, pero cabe señalar que ni el CTE (Código Técnico de la Edificación) ni las normas UNE (de AENOR) referenciadas hasta el momento, hacen especial alusión a las estructuras históricas, cuyo comportamiento puede diferir, y mucho, de una estructura nueva.

En el caso de las estructuras históricas, las “reglas de juego” eran otras en el tiempo que fueron levantadas. El conocimiento se fundamentaba en la prueba y el error, la tradición constructiva y la buena práctica y el buen hacer de los maestros constructores y carpinteros, que transmitían conocimiento a través de tratados sobre la disciplina, aunque no fueran “de obligado cumplimiento”.

Carece de sentido pues, someter al mismo examen una estructura de madera que se encuentra en fase de proyecto y cálculo sobre el papel, donde se pueden medir desde el principio las acciones que va a tener que soportar, el uso que se le va a dar y el ambiente en la que se va a colocar, y una estructura anciana que lleve siglos en pie y dando un servicio innegable. De hecho el CTE en el Documento Básico de Seguridad Estructural recomienda no utilizar directamente las normas y reglas establecidas en el propio documento por varios motivos. Se cita literalmente dicho documento (CTE.DB-SE Anejo D):

“Toda evaluación debe realizarse teniendo en cuenta las características y las condiciones reales del edificio (lo que normalmente no está contemplado en las normas de dimensionado que incorporan la incertidumbre asociada al proceso).

Las normas actuales suelen estar basadas en exigencias diferentes y generalmente más estrictas que las vigentes en el momento en que se proyectó el edificio, por lo cual, muchos edificios existentes se clasificarían como no fiables si se evaluaran según las normas actuales.

Se puede considerar, en muchos casos, un período de servicio reducido, lo que se traduce también en una reducción de las exigencias.

Se pueden emplear modelos de análisis más afinados (a través inspecciones, ensayos, mediciones in situ o consideraciones teóricas), lo que puede aportar beneficios adicionales”.

Por lo tanto, en las estructuras existentes, a veces de gran valor histórico, es donde se hace indispensable un buen estudio de la situación actual. Pese a no poder exigir lo mismo a una estructura antigua, se trata de garantizar una continuidad de la estructura, pero sin dejar de lado la seguridad para los usuarios contemporáneos. Haciendo especial hincapié en el último párrafo citado, en concreto, en la recomendación de realizar mediciones in situ, es donde se plantea la aplicación de la técnica de Hole Drilling como una herramienta fundamental para ese análisis más afinado.

4.3 Teorías de restauración y conservación de las estructuras de madera

El valor del patrimonio cultural y arquitectónico que ha llegado a nuestros días es testigo de la historia y de la evolución como sociedad. Es un legado que nos ha llegado de las generaciones pasadas y es nuestro deber mantenerlo y conservarlo para transmitirlo a las generaciones venideras. Hoy en día los elementos patrimoniales gozan del respeto y la valoración que durante algunos años parecían haber perdido, notándose una clara tendencia a la conservación del Patrimonio.

Estas ideas de necesidad de conservación y de preocupación por mantener el Patrimonio existente, fueron desarrollándose a nivel internacional dando lugar a diferentes teorías de restauración. Estas teorías empezaron a materializarse con la Carta de Atenas en 1931, aunque su desarrollo pronto se vio interrumpido por el estallido de la Segunda Guerra Mundial.

Los años posteriores al conflicto bélico fueron los años de la “reconstrucción”, en los que se afrontan arduos problemas que dan lugar a una revisión de los principios de la “restauración científica” y la codificación italiana del “restauro crítico”, retomando aquellas primeras teorías. Al mismo tiempo, se reanuda e intensifica la cooperación internacional con la fundación de la ONU (Organización Naciones Unidas), organización de la que surge la UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) y se empiezan a celebrar diversos congresos internacionales en torno a estas cuestiones. Finalmente, en 1964, se publica la Carta de Venecia guiando la conservación de monumentos. Estas dos cartas, Atenas y Venecia, junto con el concepto de “reconstrucción” tras la Guerra Mundial, conforman el detonante para numerosas ideas sobre el Patrimonio, la importancia de su conservación e interesantes debates científicos entre expertos en la materia (Flores Marín 2014).

Es en este entorno donde surge también la necesidad de evaluación de las estructuras de madera en servicio, pudiendo definirse como el proceso de inspección y análisis de los elementos constituyentes para determinar la integridad y seguridad del conjunto. Para la realización de la inspección existen diversas pautas o guías, aceptadas internacionalmente, que aunque se advierten algunas diferencias, todos se basan en establecer distintos niveles en función de la profundidad que se alcance en la inspección (ASCE 2000, Bastera, Casado et al. 2005, Bucur 2013, CIB Commission 2010, Cruz, Yeomans et al. 2015, Kasal, Anthony 2004, Machado 2013, Riggio, Anthony et al. 2014, Arriaga, Peraza et al. 2002).

En esta Tesis se ha tratado de articular el proceso teniendo en cuenta las recomendaciones de los otros autores y de las asociaciones internacionales involucradas en este ámbito, resumiéndolo según el esquema de la Figura 4.44.

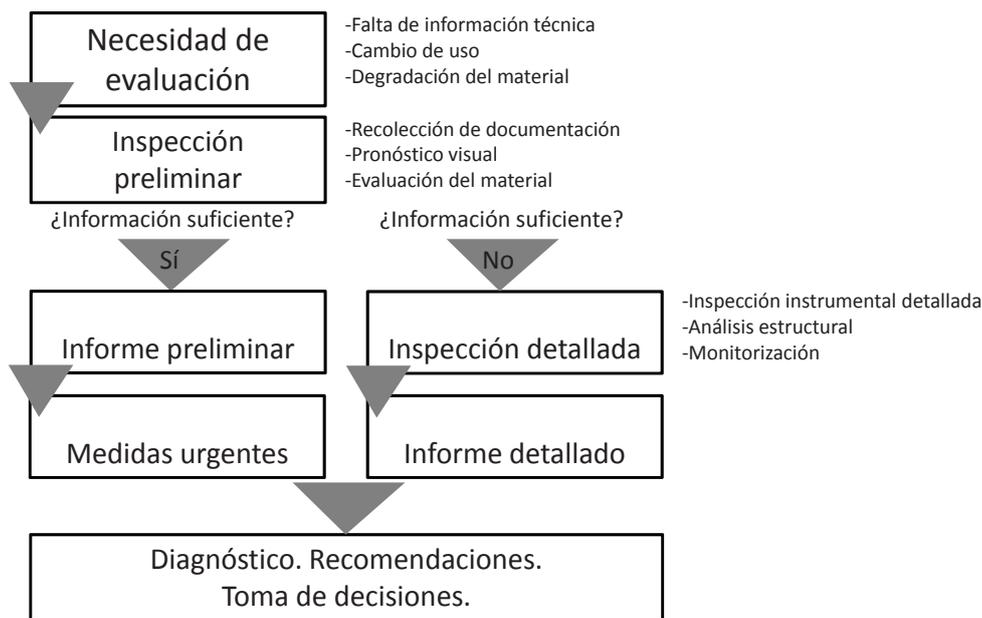


Figura 4.44
Esquema del proceso a seguir en el diagnóstico de una estructura de madera

El proceso comienza cuando existe una necesidad real de evaluación de la situación, desencadenada por algún motivo como la degradación del material componente de la estructura, un cambio de uso o por la necesidad de intervención en la estructura. El acercamiento a la situación debe realizarse a nivel documental, búsqueda de planos, fotos y demás documentación que pueda resultar de ayuda para comprender el proceso de degradación hasta la situación actual. Algunos datos de interés son la fecha de construcción, los materiales empleados en la construcción (cargas), la especie de madera, la ocupación del edificio, el uso, las obras y reformas realizadas, incidencias de tipo patológico o de incendios, tipo de terreno, etc. (Arriaga-Martitegui, Peraza et al. 2002).

Después se acude al edificio con el fin de realizar una inspección preliminar general in situ. Es un pronóstico visual y geométrico, en que no se requieren medios instrumentales sofisticados. Esta visualización sirve para detectar las zonas dañadas, puntos críticos y establecer un orden de prioridades para las próximas inspecciones más profundas. Es conveniente analizar el estado del edificio en general, cubiertas, fachadas y forjados para detectar deformaciones de posible origen estructural. Esta aproximación debe ser realizada por un técnico cuya formación y experiencia le permitan identificar lo que ve. A veces, esta inspección puede servir para tomar decisiones de urgencia, como el cierre del edificio si se detecta una situación estructural crítica.

Sin embargo, esa inspección preliminar puede no ser suficiente para realizar una diagnosis completa de la situación y ha de profundizarse realizando una inspección más detallada, valiéndose para ello de las técnicas instrumentales de evaluación in situ. A veces, como en es el caso de esta Tesis Doctoral, se diferencia entre las técnicas de caracterización del material y las técnicas de

análisis de la estructura, formando parte de éstas la técnica Hole Drilling. Tras estudiar y analizar las mediciones obtenidas en detalle, puede determinarse un diagnóstico final y tomar decisiones acerca de las acciones que han de realizarse para el correcto mantenimiento de la estructura. En la fase final el técnico debe redactar un informe, detallando la inspección que se ha realizado y recomendando las actuaciones siguientes.

Algunas de las asociaciones internacionales de relevancia en el ámbito de las construcciones históricas son ICOMOS, RILEM, ASCE y ASTM. Existen numerosas publicaciones bajo el amparo de esas siglas que sirven para fomentar y normalizar las inspecciones en las estructuras históricas. Muchas de estas publicaciones recogen recomendaciones de todo tipo, desde el orden de las actuaciones que han de llevarse a cabo en la inspección, hasta las normas de aplicación de las técnicas instrumentales concretas.

ICOMOS /www.icomos.org/

ICOMOS (*International Council on Monuments and Sites*) es una organización con una trayectoria muy larga y reconocida internacionalmente. Entre sus publicaciones cabe destacar, en lo que concierne a esta Tesis Doctoral, el documento titulado “Principios que deben regir la Conservación de las Estructuras Históricas en Madera”, fruto de la 12ª asamblea celebrada en el año 1999 en México.

Como indica el propio título del documento, en él se presentan los principios y métodos de actuación para la protección y la conservación de las estructuras históricas de madera, de tal forma que se respete su significado cultural. El documento aporta un total de 15 recomendaciones ordenadas según los siguientes puntos que deberían tomarse en cuenta en cualquier labor restauradora:

- Inspección, recogida de datos y documentación
- Vigilancia y mantenimiento
- Intervenciones
- Reparación y sustitución
- Reservas de bosques históricos
- Materiales y técnicas de construcción contemporánea
- Formación

Las recomendaciones aluden a la importancia que han tenido las estructuras de madera en todas épocas y en cualquier lugar formando parte del patrimonio cultural mundial y a su gran variedad a lo largo y ancho del planeta, debido a la gran diversidad de especies y calidades botánicas.

También reconoce la vulnerabilidad de las estructuras frente a los deterioros y degradaciones del material y su consecuente escasez de estructuras de madera

en el Patrimonio. Estos factores promueven y hacen necesarios documentos como éste para poder favorecer y garantizar, en la medida de lo posible, la conservación de las estructuras históricas supervivientes y evitar así la pérdida de oficios, técnicas y sistemas de construcción tradicionales.

El posterior documento redactado en el año 2003 por el comité científico de ICOMOS, conocido como ISCARSAH (*International Scientific Committee on the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage*), bajo el título de “Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico” (ICOMOS/ISCARSAH Committee 2005), también se ha tenido en cuenta en el desarrollo de la presente tesis, sobre todo en lo que al comportamiento estructural se refiere y más concretamente al apartado en el que se alude a la madera.

La forma y las uniones estructurales, el material constructivo y las acciones (fuerzas, aceleraciones y deformaciones) son tres aspectos que influyen en toda estructura, sea histórica o no. El comportamiento estructural depende de las características de los materiales que la componen o de las dimensiones estructurales, entre otros factores. El comportamiento real es complejo, sobre todo cuando no existe documentación técnica. Esta Tesis pretende aportar un dato empírico fundamental acerca del estado tensional de un determinado elemento estructural. En cuanto a las características de los materiales, y en particular a la resistencia, destacar que pueden verse reducidas por procesos de deterioro. En consecuencia, saber cuál es el estado real y actual (del momento) de elemento estructural analizado es fundamental antes de realizar cualquier otro cálculo. Existen varias técnicas para la evaluación in situ que se exponen en otros apartados.

Las acciones mecánicas son definidas como aquellas provocadas por cualquier agente que produce esfuerzos y tensiones en la estructura. Las acciones pueden ir variando a lo largo de la vida del edificio y a menudo esos cambios son los que causan daños. También se consideran acciones, en este caso de carácter biológico o químico, los fenómenos que afectan a la resistencia de los materiales.

En el proceso de deterioro de una estructura de madera, existen muchos factores influyentes. La finalidad del diagnóstico o de la evaluación es conocer esos factores y determinar la realidad actual. Se trata de determinar, con la mayor precisión que los instrumentos permitan, la situación actual de deterioro. Las técnicas e instrumentos de evaluación in situ están adquiriendo un gran protagonismo a la hora de concluir en un diagnóstico. Se puede distinguir entre daños en la integridad del material o daños a nivel estructural. Estos últimos se producen cuando las tensiones producidas por una o más acciones son mayores que la resistencia de los materiales o de los elementos portantes. En el análisis estructural de un edificio existente, es importante pues conocer ambas, tanto la tensión existente en un elemento estructural

como su capacidad resistente máxima. De este modo se podrá determinar si la estructura puede seguir cumpliendo su función portante, si hay necesidad de sustitución o de si el colapso es inminente.

En el año 2011, en Lisboa, se convocó la primera edición del congreso SHATIS (*International conference on Structural Health Assessment on Timber Structures*) bajo el amparo de ICOMOS (<http://shatis11.inec.pt/>). Desde entonces se han celebrado dos ediciones más, la última en septiembre de 2015 en Wroclaw (Polonia). En esta conferencia se presentaron comunicaciones internacionales sobre varios de temas de gran interés en el mundo de las estructuras históricas de madera y de su conservación y también de las estructuras de madera contemporáneas. Estos fueron los temas principales, refiriéndose en primera instancia a las estructuras históricas de madera:

- Estructuras de madera históricas
- Estructuras de madera laminada
- Estructuras de madera contralaminada o CLT (*Cross-Laminated Timber*)
- Estructuras compuestas incluyendo madera
- Construcciones de madera exótica
- Estructuras especiales de madera – puentes, torres, andamios, etc.
- Construcciones de madera en la lista de Patrimonio (UNESCO LIST – GLOBAL HERITAGE) – valores, problemas, conservación
- Modernización, la reutilización de construcciones de madera
- Monitorización y diagnóstico
- Casos de estudio
- Análisis experimental y Ensayos
- Análisis teórico y numérico
- Refuerzo y conservación
- Materiales y técnicas tradicionales e innovadoras
- Modernización, nuevos usos
- Estrategias de interacción, las doctrinas de conservación, principios y recomendaciones

RILEM /www.rilem.org/

RILEM es una organización fundada en 1947 con el ánimo de promover la cooperación científica en el área de los materiales de construcción y las estructuras. RILEM es el acrónimo francés de *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*. Traducido al inglés como *International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures*.

De RILEM resulta especialmente interesante el documento titulado "*In-situ assessment of structural timber*" (Kasal, Tannert 2011) donde se explican los pasos a seguir en la evaluación de la madera estructural y las técnicas disponibles en la actualidad para que esa evaluación sea completa. El documento es una compilación de distintos artículos específicos en la que científicos e investigadores internacionales vuelcan sus conocimientos sobre las técnicas y métodos que han desarrollado o puesto a punto, de una manera organizada y actualizada.

ASCE /www.asce.org/

Las siglas ASCE dan respuesta a la *American Society of Civil Engineers*. En la actualidad es un colegio profesional, pero fue fundada en 1852 como la primera Sociedad Nacional de ingenieros y arquitectos de América. Interesa, en esta Tesis Doctoral, la publicación titulada "*Guideline for Structural Condition Assessment of Existing Buildings*" (ASCE 2000).

ASTM /www.astm.org/

Acrónimo inglés de *American Society for Testing and Materials*, una organización reconocida internacionalmente para el desarrollo y la difusión de normas o standards consensuados internacionalmente. ASTM fue fundada en 1898, aportando una elevada cantidad de normas en torno a las estructuras de madera, a la madera como material y a la realización de ensayos de caracterización. En la realización de esta Tesis tiene un peso fundamental la Norma ASTM E837, que aunque no esté entre las normas propiamente aplicables sobre las estructuras de madera, es la que describe el proceso del método de Hole Drilling.

COST /www.cost.eu/

Alternativamente, existe desde su creación en 1971, una red europea de coordinación de la investigación, a través de la cual los investigadores europeos pueden desarrollar conjuntamente sus ideas e iniciativas en todos los campos de la ciencia y la tecnología, realizando actividades de investigación financiadas a nivel institucional. Estos programas son conocidos como COST (*European Cooperation in Science and Technology*).

Concretamente en la acción COST denominada "*Assessment, Reinforcement and Monitoring of Timber Structures*", cuya referencia es FP1101 (www.costfp1101.eu) están involucrados científicos con renombre en el mundo de la evaluación in situ de las estructuras de madera (D'Ayala, Branco et al. 2014, Kasal 2013). Esta Acción COST fue creada a partir de la necesidad de diseñar nuevas estructuras de madera, dada la importancia que las estructuras de madera han adquirido en los últimos años, y por la necesidad de evaluar las estructuras de madera existentes. La Acción está dividida en tres grandes grupos de investigación de las estructuras de madera:

- Evaluación (*Assessment*), liderado por Mariapaola Riggio
- Refuerzo (*Reinforcement*), liderado por Annette Harte

- Monitorización (*Monitoring*), liderado por Jochen Kurz

La técnica de Hole Drilling podría formar parte de las técnicas útiles en la evaluación estructural, siguiendo las recomendaciones de todas estas organizaciones. Hole Drilling puede colaborar enormemente en la inspección, recogida de datos y documentación de las estructuras existentes, dando a conocer el estado tensional o de cargas concluyendo el análisis propiamente estructural.

Capítulo 5

ESTADO DEL ARTE

La investigación que acomete esta Tesis Doctoral se desarrolla en el ámbito del Patrimonio Construido, y más concretamente, en lo referente a la evaluación o diagnóstico (*assessment*) de las estructuras de madera en los edificios existentes. Durante el proceso de inspección deben medirse y determinarse tanto las características propias de la madera como material como las del conjunto de la estructura mediante un análisis estructural.

En la actualidad existen diversos métodos y técnicas para la consecución de esos objetivos gracias a la creación de instrumentos que posibilitan la medición de algunas propiedades de la madera. Las propiedades del material pueden estimarse mediante la clasificación, visual o mecánica, o la medición de ciertos parámetros físicos que se relacionan con la densidad, módulo de elasticidad, resistencia de la madera o estado de conservación. En el siglo XX nace lo que hoy se conoce como Evaluación No Destructiva (END) refiriéndose a la información obtenida mediante la aplicación de técnicas que no infieren daños al material durante la medición, o en su caso, un daño menor.

Lo interesante en este ámbito es que las mediciones puedan ser realizadas en el propio edificio, directamente sobre los elementos estructurales a analizar, sin la necesidad de extraer piezas, ni muestras, evitando así daños innecesarios.

5.1 Técnicas de caracterización de elementos de madera in situ

La regulación de la madera como material estructural, gracias a la aparición y divulgación de una normativa cada vez más amplia, trajo como consecuencia el conocimiento de las propiedades mecánicas de la madera, pudiendo establecer unas clases resistentes tanto en coníferas como en frondosas y agruparlas según sus propiedades físicas, mecánicas y elásticas. Hoy en día el diseño y el cálculo de las nuevas estructuras de madera se basa en dicha normativa resultando de gran utilidad para los técnicos calculistas, regulando su labor, e incentivando el uso de la madera en la construcción de nuevas estructuras.

Sin embargo, no procede aplicar directamente los criterios que se utilizan para

la construcción y cálculo de las nuevas estructuras en las estructuras antiguas. En la época en la que las estructuras que consideramos históricas fueron construidas, no se disponía de la base científica ni normativa que se tiene en la actualidad. Su construcción se basaba en la prueba y error, en la intuición y en la tradición. Muchas veces se pecaba de sobredimensionamientos y abuso de elementos estructurales innecesarios. Además el paso del tiempo a menudo, hace que las condiciones iniciales de una estructura se vean modificadas o afectadas (Liotta 2000). Es en este panorama, cuando nos enfrentamos a las estructuras históricas, donde se hacen necesarias las técnicas de evaluación in situ.

Organizaciones de reconocimiento internacional, como se ha visto en capítulos anteriores, aconsejan la realización de exploración y diagnóstico previa a las actuaciones de reparación en edificios históricos. Surgen, por necesidad, las distintas técnicas de evaluación, fundamentales para la ejecución de una buena inspección de los elementos constructivos de madera (ASCE 2000, CIB Commission 2010, Cruz, Yeomans et al. 2015, Kasal, Tannert 2011).

Cada vez más autores internacionales dedican su tiempo y su esfuerzo a desarrollar y mejorar las técnicas de evaluación, trabajando por una inspección de mayor calidad en elementos de madera (COST/FP1101). Cabe destacar el documento, publicado por RILEM, titulado "*In situ assessment of structural timber*" (Kasal, Tannert 2011) que sirve para circunscribir el tema que se va a tratar a continuación. Esta publicación ha sido realizada gracias a las aportaciones de varios autores, entre los que se encuentran los profesores Bohumil Kasal, Thomas Tannert, Ronald W. Anthony o Mariapaola Riggio, entre otros nombres que se repiten en las publicaciones que se han revisado para la redacción de esta parte de la investigación.

La inspección de una estructura ha de hacerse en el propio edificio y, por tanto, se emplean técnicas que deben ser portátiles y de fácil manejo. Estas técnicas de evaluación in situ, además de para la evaluación de la estructura, son muy útiles para detectar y medir deterioros, a veces difíciles de cuantificar, proporcionando un diagnóstico actualizado de la situación de la estructura objeto de estudio. La necesidad de dicha evaluación puede venir por varios motivos (Kasal, Tannert 2011):

- Confirmar el estado real de una estructura dañada
- Necesidad de protección de las estructuras históricas
- Un cambio de usos, que probablemente acarrea un cambio en el estado de las cargas
- Deformaciones excesivas que hacen sospechar una sobrecarga

Lo que se puede aprender, comprender y valorar de la inspección de las estructuras históricas es un legado invaluable: los problemas que acaecen en los elementos estructurales de madera con el paso del tiempo aportan

un conocimiento directamente aplicable a las construcciones actuales y a las del futuro, comprendiendo mejor el deterioro que puede llegar a sufrir. Cabe destacar la capacidad portante que puede llegar a tener un elemento estructural degradado, que pese a haber disminuido sus propiedades físicas se mantiene en pie. En este trabajo se van a diferenciar, por un lado, las técnicas que sirven para la caracterización del material y la evaluación de los estados de conservación y, por otro lado, las técnicas particulares de análisis estructural.

Evaluar el material significa averiguar de qué especie se trata y en qué estado de conservación se encuentra. Para ello se miden propiedades intrínsecas como la densidad o el módulo elástico. Estos datos pueden ayudar a identificar la especie arbórea y su clase resistente (UNE EN 338). Por otro lado, el contenido de humedad y la falta de material sirven para acotar el estado de conservación o degradación.

El objetivo de un buen análisis estructural es llegar a conocer el estado de tensiones de un elemento estructural por el mero hecho de estar soportando cargas y demás acciones en la edificación. El riesgo de colapso es el mayor de los temores en el mundo de la restauración, por eso, obtener información acerca de la situación real es tan importante. Es necesario conocer, obviamente, el límite de rotura de la misma para establecer las relaciones oportunas y determinar si existe riesgo de colapso.

Toda inspección empieza por un estudio visual de la estructura que la comprenda como un todo. Es fundamental que la inspección de la estructura la haga un técnico cualificado que sepa qué mirar y medir y que sepa qué métodos y técnicas de evaluación o análisis estructural in situ tiene disponibles para cada caso. El técnico competente debe ser capaz de comprender los datos obtenidos y finalmente tomar las decisiones más adecuadas.

Entre las técnicas de evaluación estructural in situ se pueden diferenciar tres tipos en función del grado del daño inferido al elemento: No Destructivas (NDT), Semi-Destructivas (SDT) y Destructivas. Todas se emplean con el fin de evaluar rápida y objetivamente las propiedades físicas, mecánicas, elásticas y resistentes de la madera. En el mundo de la conservación del patrimonio, por razones obvias, las técnicas totalmente destructivas deben quedar al margen. De aquí en adelante esta Tesis Doctoral se centrará exclusivamente en las NDT y SDT.

Normalmente, las técnicas de aplicación in situ, relacionan un parámetro medible con alguna de las propiedades del material, por ejemplo y como se muestra a continuación, la resistencia a la penetración de una aguja puede relacionarse con la densidad del material o la resistencia al paso de una corriente eléctrica puede relacionarse con el contenido de humedad.

Las técnicas de inspección in situ son técnicas que han sido utilizadas durante años en el estudio de la madera de los árboles vivos y en la caracterización de

la madera estructural en los laboratorios con el fin de conocer sus propiedades, siendo trasladadas en última instancia a las estructuras de madera. Las técnicas de caracterización del material sirven para poder incluir información relativa a resistencia, rigidez y densidad en las normas. Las técnicas que interesan en lo que acomete a esta Tesis Doctoral son aquellas que se han adoptado de esos otros ámbitos, el de la madera viva y la caracterización de las clases resistentes, y que han sido adaptadas para la evaluación de la madera en estructuras existentes en el propio edificio o in situ.

Esta investigación tiene como objeto poner a punto la técnica de Hole Drilling para ser aplicada en elementos de madera in situ. Sin embargo, resulta necesario un trabajo experimental en el laboratorio con el fin de estudiar el comportamiento de la madera y la propia técnica bajo condiciones de contorno controladas, y después aplicarla in situ en una estructura real. En una estructura real existen algunas limitaciones que no se dan en el laboratorio, y que han de tenerse en cuenta. Por ejemplo, en una estructura en servicio el acceso a los lugares de auscultación puede ser dificultoso. Es habitual encontrarse con limitaciones en el caso de que los elementos se encuentren embebidos o empotrados o a gran altura e incluso pueden existir problemas logísticos por ausencia de tomas eléctricas para la conexión de los equipos o escasez de iluminación.

El número de publicaciones acerca de la evaluación in situ de las estructuras de madera es cada vez mayor, y en ellas se marcan las pautas a seguir en el proceso de análisis para cada una de las técnicas que pueden utilizarse (Kasal, Tannert 2011). En cualquier medición que se haga in situ, deben tenerse en cuenta las limitaciones e ir provisto de todo el material auxiliar que se prevea necesario.

Habitualmente, cuando se habla de la caracterización de los distintos tipos de madera a nivel experimental o de laboratorio, la Evaluación No Destructiva (END) se clasifica en distintos grupos, según el método empleado (Tabla 5.1).

Tabla 5.1

Clasificación de los métodos No Destructivos

| | |
|----------------------------------|--|
| Métodos Mecánicos | Se basan en la aplicación de cargas y otras acciones mecánicas en el laboratorio |
| Métodos Acústicos | Se basan en la determinación de la velocidad de transmisión del sonido a través de los materiales |
| Métodos Electromagnéticos | Se basan en mediciones realizadas mediante el paso de corrientes eléctricas y campos electromagnéticos |
| Métodos Nucleares | Son métodos adoptados de otras disciplinas como la medicina. Son técnicas de transmisión de rayos X, rayos gamma o la resonancia magnética |

Se describen a continuación los métodos y técnicas más habituales entre la comunidad científica internacional, en función del daño inferido al elemento durante la medición. Se trata de técnicas útiles también para la evaluación in situ de las estructuras de madera, habiendo sido utilizadas con anterioridad

en los laboratorios para la clasificación de las distintas maderas con el fin de introducirlas en la normativa y en la evaluación de los árboles vivos, como se ha especificado antes. Muchas son técnicas que se han utilizado de manera generalizada en el estudio de materiales, en los controles de calidad, en el ámbito de la medicina e incluso con objetivos militares, adaptándolas para su uso en madera.

5.1.1 Técnicas de evaluación in situ no-destructivas

(NDT- Non Destructive Testing)

La Evaluación No Destructiva (END, en castellano) sirve para inspeccionar, identificar y evaluar propiedades físicas y mecánicas de la madera y el estado de conservación de un elemento estructural sin alterar ni modificar su integridad física ni prestaciones. Para proceder a la realización de esta inspección son necesarias una serie de pruebas y mediciones mediante la utilización de técnicas que están en continuo desarrollo en los principales laboratorios de investigación (Anthony, Renforth et al. 1998, Rendler, Vigness 1965, Riggio, Anthony et al. 2014). En este apartado se consideran las técnicas totalmente inocuas, donde se recogen la inspección visual y la inspección mediante la emisión de distintos tipos de ondas, utilizando diversos equipos.

Inspección visual preliminar (*Visual inspection*)

Se trata de un primer reconocimiento general de la estructura (la especie arbórea, su capacidad portante, su estado de conservación, etc.) en los que no es necesaria ninguna herramienta sofisticada. Un martillo, un punzón, una cámara de fotos, un cuaderno y un lápiz son suficientes para hacer las anotaciones pertinentes sobre las primeras impresiones. Se realiza un diagnóstico preliminar teniendo en cuenta la naturaleza de la madera, su contenido de humedad y degradaciones y los daños mecánicos (sobre todo roturas y deformaciones) (UNE 41805-3 IN).

La evaluación visual es el método más antiguo que existe, sirviendo para discernir particularidades de la madera desde el momento inicial; nudos, fendas, desviación de la fibra, bolsas de resina, ataques patológicos, etc. Es fundamental que el técnico, en buenas condiciones de seguridad e iluminación, sea capaz de reconocer también las zonas afectadas y pueda determinar las mediciones concretas y los equipos que se van a necesitar en el análisis posterior. A partir de aquí se puede impulsar una evaluación más concreta y profunda, con la ayuda de técnicas específicas.

La primera norma de clasificación visual fue desarrollada en Estados Unidos por el Laboratorio de Productos Forestales en la década de 1920 en el estudio de las resistencias de las distintas especies. A mediados de siglo comenzaron a desarrollarse normas similares en Europa, siendo las primeras las alemanas normas DIN. En la actualidad cada país tiene su propia normativa distinguiendo categorías y calidades. La norma alemana DIN 4074-5, la francesa NF B52-001

o la española UNE 56544 son distintas normas de clasificación pero tienen en común que relacionan las singularidades de la madera, según la localización, tamaño y cantidad, con su calidad. Todas estas normas hacen referencia a la clasificación visual en los laboratorios y no a las estructuras de madera en arquitectura.

En España, desde 2009, existe un informe AENOR propiamente para abordar la inspección, diagnóstico y peritación de edificios con estructuras antiguas. En él se hace referencia a varios puntos a tener en cuenta en una inspección visual, y resulta muy recomendable para cualquier técnico competente (UNE 41805 IN). Otra norma AENOR de 2013, en referencia al diagnóstico de estructuras existentes es la UNE 41808, a la que ya se ha hecho alusión en un capítulo anterior. En esta Norma se indica cómo se debe representar el estado constructivo de una estructura de madera existente, de total utilidad para un técnico en esta fase de la inspección de un edificio. En realidad se trata de un comité completo dentro AENOR, bajo el código SC8, sobre la conservación, restauración y rehabilitación de edificios.

La estimación de la calidad y del estado de la madera mediante inspección visual cuenta con una larga tradición, pero probablemente la tendencia sea cada vez más a una inspección más instrumental.

Medición de contenido de humedad (*Moisture measurement*)

La madera presenta variaciones en sus características en función de su contenido de humedad. Este material poroso es capaz de intercambiar moléculas de agua con el ambiente que se rodea, por ser un material de naturaleza higroscópica. La masa de la madera húmeda es mayor que en su estado anhidro o seco, al contener agua en sus cavidades porosas. En consecuencia, el contenido de agua en su estructura tubular interna, hace que una pieza de madera modifique su volumen, y en consecuencia también su densidad. Por eso, cualquier dato referente a las propiedades físicas y mecánicas de la madera debe ir acompañado por el nivel de humedad en la que ha sido realizada dicha medición. La humedad, además influye, en otros muchos aspectos físicos del material. La conductividad térmica y eléctrica también aumenta en un alto contenido de humedad y el riesgo a ser atacado por agentes xilófagos crece exponencialmente.

Uno de los métodos principales para determinar el contenido de humedad es el de desecación hasta el estado anhidro. La Norma UNE-EN 13183-1 establece el procedimiento para realizar esta medición. Para ello es necesaria la extracción de una probeta del elemento estructural objeto de estudio. En el laboratorio puede pesarse mediante una báscula de precisión la pieza de madera extraída que contiene agua en su interior y a continuación esa misma pieza puede secarse totalmente mediante una estufa y volver a pesarse. La diferencia entre esas dos medidas sirve para hallar el Contenido de Humedad relativo:

$$CH(\%) = \frac{M_h - M_0}{M_0} \cdot 100$$

Siendo:

M_h La masa de la pieza de madera a un determinado contenido de humedad (kg)

M_0 La masa anhidra de la misma pieza, humedad 0% (kg)

CH El contenido de humedad relativo (%)

Es preferible realizar la medición del contenido de humedad in situ, por la inmediatez, la comodidad y la objetividad. Además de que debe evitarse extraer muestras del elemento analizado, su humedad puede variar en el trasiego del edificio al laboratorio. Existen otros sistemas de medición del contenido de humedad, como el higrómetro de resistencia eléctrica o el de ondas microondas, resultando inocuos para el elemento analizado y de aplicación in situ.

Existe una relación casi lineal entre la resistencia que presenta la madera al paso de una corriente eléctrica y el contenido de humedad y existe también un aparato capaz de determinar dicha relación in situ y de forma instantánea. Se trata del xilohigrómetro de resistencia (Figura 5.1) y puede utilizarse desde la primera inspección por su facilidad de manejo y total portabilidad. El rango óptimo de lectura se encuentra entre 7-25%, fuera de él las mediciones pueden no ser correctas.



Figura 5.1
Xilohigrómetro de resistencia eléctrica convencional

La Norma UNE-EN 13183-2 establece las especificaciones acerca de la medición de la humedad por resistencia eléctrica. Este tipo de xilohigrómetro dispone de dos puntas de acero que penetran en la superficie de la madera, capaces de medir la resistencia óhmica en función del contenido de humedad de la pieza en el instante de la medición. Esa resistencia eléctrica y el contenido de humedad se relacionan linealmente, y en este principio se basan las mediciones realizadas mediante este tipo de xilohigrómetros.

Pese a que habitualmente en los procesos de inspección de madera estructural

se utilizan higrómetros de resistencia eléctrica, también existen técnicas basadas en la emisión de microondas. Éstos miden la atenuación de una señal electromagnética y el desplazamiento de la fase para deducir el contenido de humedad de un elemento de madera (Kabir MF, Khalid KB et al. 1997). El higrómetro por microondas (Figura 5.2) es tan útil para su aplicación in situ como el de resistencia, pero no se recomienda específicamente para su uso en madera aunque sí para otros materiales sólidos, llegando a grandes profundidades de medición (300 mm).



Figura 5.2
Higrómetro por microondas

Métodos acústicos (Sound Methods)

Los métodos acústicos sirven para la clasificación y evaluación de la madera desde la antigüedad. Basta un golpeteo con los nudillos para percibir oquedades o madera en mal estado. Los sistemas acústicos más sofisticados han sido aplicados en diversos materiales y campos, destacando su aplicación en el control de las soldaduras en las estructuras metálicas. En madera, los métodos acústicos fueron primero incluidos en la clasificación mecánica de la madera aserrada y posteriormente en la diagnosis de las estructuras existentes. Existen numerosas técnicas entre las que pueden existir diferencias entre el tipo de impulso acústico, el procedimiento del ensayo o la recepción de la señal, pero en todas, el fundamento es determinar las propiedades elásticas de los elementos de madera, mediante la medida de la velocidad de propagación de las ondas acústicas a través de los mismos (Bucur, Archer 1984). Estimando el tiempo que la onda sónica o ultrasónica tarda en recorrer una distancia previamente determinada entre dos puntos de un mismo elemento portante, se puede calcular el módulo de elasticidad dinámico. Ese módulo elástico dinámico, con un valor ligeramente superior, guarda unas relaciones directas y conocidas con el estático (Bucur, Archer 1984). Matemáticamente se relaciona con la velocidad de propagación de la onda y la densidad del medio.

$$E_{din} = v^2 \cdot \rho$$

Siendo:

$$E_{din} \quad \text{Módulo elástico dinámico (MPa)}$$

- v Velocidad de propagación de la longitud de la onda (m/s)
- ρ Densidad de la madera (kg/m³)

La densidad de una pieza de madera puede determinarse sin grandes dificultades utilizando una báscula para determinar su masa (kg) y midiendo su volumen (m³). Sin embargo, en el caso de un elemento portante, la evaluación ha de realizarse in situ. El elemento portante permanece en su sitio cumpliendo su función estructural y la densidad ha de determinarse por otros medios. Existen entre las NDT, como se verá a continuación, distintos instrumentos que relacionan ciertos parámetros con la densidad de la madera, por ejemplo la resistencia a la penetración que presenta la madera según su densidad.

Los equipos acústicos, habitualmente, no miden la velocidad de propagación directamente sino el tiempo que tarda en recorrer la onda emitida el espacio existente entre el emisor y el receptor. Se distinguen los equipos en función de la señal acústica que se emplee:

- Onda sónica: frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 20 kHz
- Onda ultrasónica: frecuencia superior a 20 kHz

Aunque en madera no se haya alcanzado todavía la dilatada experiencia que existe en otros materiales, como el hormigón, existen en la actualidad, y a nivel internacional, diversos grupos de investigación dedicados a su estudio tanto en árboles vivos (Arciniegas, Brancheriau et al. 2015, Hasegawa, Mori et al. 2015) como en la caracterización de madera e inspección estructuras de madera (De Andrade Maia, Schneider et al. 2014, Liu, Declercq 2015, He, Di 2015, In Young Yang, Kwang Hee Im et al. 2005, Tanasoiu, Miclea et al. 2002).

Las ondas sónicas, comprendidas entre 20 Hz y 20 kHz, son vibraciones mecánicas cuya velocidad depende de la densidad y de las propiedades elásticas del medio por el que discurren, siempre en frecuencias audibles para el ser humano. En estos equipos, la señal emitida es un golpe seco con un martillo en el cabezal emisor (Figura 5.3). El parámetro medible es el tiempo (s) que transcurre desde que se ha propinado el golpe en el emisor hasta que el receptor lo recibe.



Figura 5.3
Imágenes de un equipo de emisión de ondas sónicas

Si se utiliza un equipo de ultrasonidos (Figura 5.4), la frecuencia de la onda estará por encima de los 20 kHz, es decir por encima del umbral audible para el ser humano. En estos equipos existe un palpador emisor, que emite una señal automáticamente, y un palpador receptor que la recibe. En realidad los palpadores en este caso, son transductores piezoeléctricos capaces de convertir la respuesta en una señal eléctrica. El funcionamiento es similar al anteriormente descrito, emitiéndose una onda de menor longitud en este caso.



Figura 5.4
Equipo Sylvatest®, imagen del CETEMAS
(Centro Tecnológico Forestal y de la
Madera, Palencia)

En el caso de la madera, tanto en los equipos de ondas sónicas como de ondas ultrasónicas, los cabezales se clavan en el elemento objeto de estudio para que el contacto entre el palpador y el medio sea total. Estos equipos miden el tiempo desde que se ha emitido la señal a través de uno de los cabezales hasta que se ha recibido en el otro cabezal. Matemáticamente:

$$v = l / t$$

Siendo:

v Velocidad de propagación de la longitud de la onda (m/s)

l Distancia entre emisor y receptor (m)

t Tiempo (s)

En general, las ventajas son las mismas se utilicen ondas sónicas o ultrasonidos; los equipos son portátiles y fáciles de utilizar en ambos casos. Sin embargo, la resolución es mejor cuando se trata de ultrasonidos, ya que son capaces de detectar defectos más pequeños aunque su alcance sea menor.

Por otro lado, la medición puede ser directa, indirecta o semidirecta (Figura 5.5). Se denomina directa a la medición realizada entre testas, es decir cuando el emisor está en una de las testas y el receptor en la testa opuesta, de modo que la medición es paralela a la dirección de las fibras. Se denominan indirectas o semidirectas a las mediciones en las que los palpadores se colocan en la misma cara o formando un ángulo entre sí. Los emisores transmiten la señal pero llega al receptor con una energía menor, por lo que la señal no es tan clara como en una medición directa.

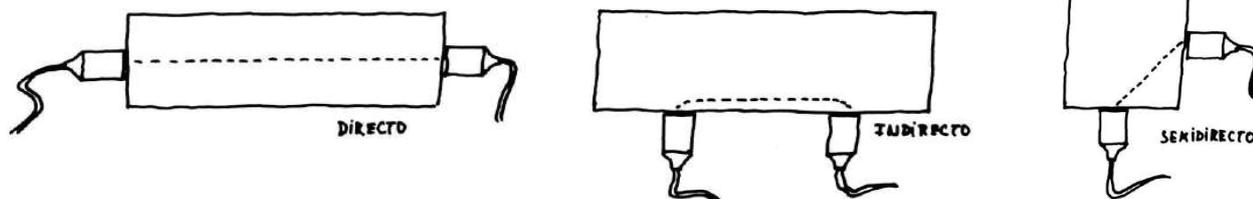


Figura 5.5

Dibujo de F. Arriaga diferenciando los procedimientos de medición con ultrasonidos; directo, indirecto y semidirecto (Arriaga, Peraza et al. 2002)

La medición directa es la más deseable pero la realidad en las estructuras en servicio es que nunca o casi nunca pueden realizarse mediciones directas entre testas, ya que éstas suelen estar empotradas en los muros y el acceso a ellas es imposible. La mayoría de las veces hay que optar por una medición indirecta o semidirecta.

Además, estas técnicas acústicas, sirven también para adivinar una discontinuidad en el material (fendas, nudos, pudriciones y huecos) si el tiempo de transmisión de la onda aumenta con respecto al medido en una pieza sana (Figura 5.6). En el caso de haber una discontinuidad en el material, la onda trata de evitar el obstáculo por lo que su recorrido es más largo.

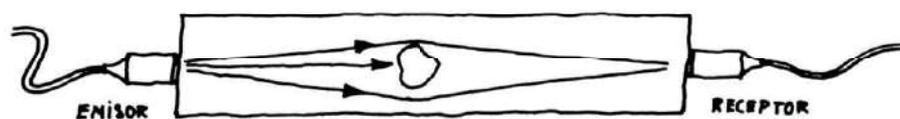


Figura 5.6

Detección de una discontinuidad mediante la transmisión de ondas (Arriaga, Peraza et al. 2002)

Los métodos acústicos son muy versátiles y fáciles de aplicar, además de resultar totalmente inocuos para el objeto de estudio. Dentro de las técnicas de inspección resultan ser de gran interés para muchos investigadores, ya que además de servir para localizar y cuantificar anomalías internas ayudan a determinar la elasticidad del material, ampliando así el abanico de aplicaciones. A nivel estatal también existen varios estudios de relevancia en esta materia, con diferentes técnicas y distintos objetivos; clasificar la madera estructural (Acuña, Díez-Barra et al. 2006, Acuña, Díez-Barra et al. 2007, Hermoso, Fernández-Golfín et al. 2003), predecir la resistencia y rigidez de la madera (Conde García, Fernández-Golfín et al. 2007) o estudiar la influencia de la humedad en la propiedades mecánicas de la madera (Montero, de la Mata et al. 2015).

Vibraciones inducidas (*Stress waves*)

Este grupo de técnicas se basa en los mismos principios que los métodos acústicos. De hecho, a menudo, el concepto *stress waves* incluye las aplicaciones acústicas (Kasal, Tannert 2011). En este caso, se alude al hecho de provocar una vibración en la pieza mediante un impacto directo en ella, sin necesidad de un palpador que transmita la onda. El impacto provoca una vibración y el modo de

vibración natural del elemento puede relacionarse con sus propiedades físicas (densidad y elasticidad). La técnica se basa concretamente en el análisis de la frecuencia de esas vibraciones inducidas al golpear la pieza de madera.

La relación entre la elasticidad y la frecuencia de vibración fue descubierta a mediados del siglo XIX pero para determinar propiedades en materiales homogéneos e isótropos (Jayne 1959) y ha ido especializándose hasta llegar a aplicarse en elementos de madera (Halabe, Bidigalu et al. 1997, Pellerin, Ross, Sobue 1986a). La medida de la frecuencia de resonancia de vibración se relaciona con el módulo elástico dinámico del medio por el que discurre y con su densidad. Esta técnica es conocida también con su nombre anglosajón, *Portable Lumber Grader* (PLG) y no difiere tanto de los métodos acústicos matemáticamente:

$$E_{din} = (2 \cdot L \cdot f)^2 \cdot \rho$$

Siendo:

- E_{din} Módulo elástico dinámico (MPa)
- L Longitud de la pieza (m)
- f Frecuencia natural de vibración (Hz)
- ρ Densidad de la madera (kg/m^3)

Para la realización del ensayo (Figura 5.7), con la ayuda de un martillo, se golpea directamente la pieza de madera para provocar en ella una vibración o una onda de presión (*stress wave*) que recorra toda su longitud. Habitualmente el modo de vibración provocado es longitudinal, mediante un impacto directamente en una de las testas. La pieza debe estar apoyada sobre dos soportes mullidos para que pueda vibrar libremente. En ocasiones, uno de los soportes es una balanza para poder medir simultáneamente el peso, y traducirlo en densidad si se conocen las dimensiones de la pieza. Resulta necesario colocar un micrófono cerca de la testa contraria con el fin de recibir la onda de presión generada. Se precisa un software específico para procesar la señal, traduciéndola en frecuencia de vibración, y directamente asignarle a una clase resistente.

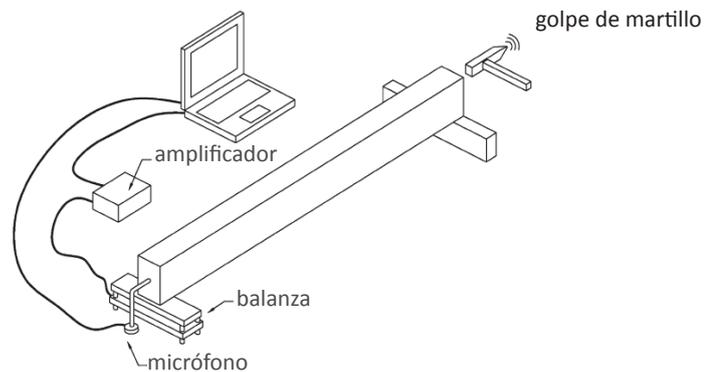


Figura 5.7

Esquema del ensayo de vibraciones inducidas en una pieza de madera (Íñiguez, Arriaga et al. 2007)

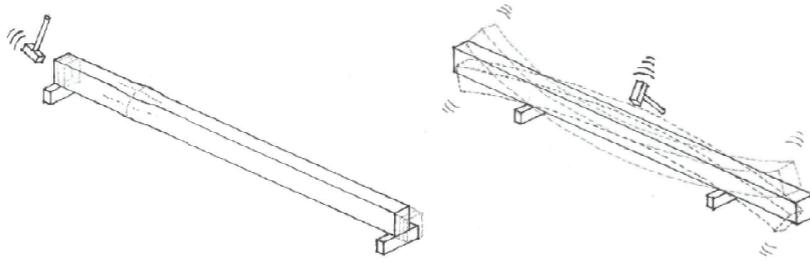


Figura 5.8
Diferentes modos de vibración en una pieza prismática de eje longitudinal (Íñiguez 2007)

Puede provocarse vibración en una pieza de diversos modos (Sobue 1986a, Brancheriau, Baillères 2002), según las condiciones de apoyo y en lugar donde se golpee la pieza (vibración longitudinal o vibración de flexión, Figura 5.8).

La determinación del módulo elástico dinámico mediante su frecuencia resonante fue aplicada por primera vez en hormigón. Posteriormente fue introducida en madera para calcular el módulo elástico dinámico, utilizando la transformada de Fourier (Sobue 1986b). Si bien es cierto que numerosos factores afectan a la medición de esa resonancia, como el tamaño de la probeta. Cuando más grande es la probeta, menores son las frecuencias de resonancia y, en consecuencia, más altos los valores de los módulos elásticos.

Al igual que en las ondas emitidas por sonidos, y al igual que se ha realizado en la inspección de otros materiales, la velocidad de propagación de un onda de impacto a través de la madera es diferente si existen degradaciones en el interior de la pieza analizada (Figura 5.9).

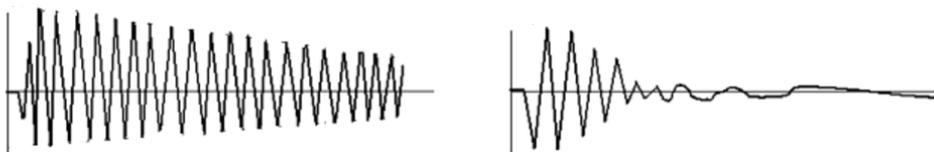


Figura 5.9
Diferencia de atenuación de la frecuencia de vibración entre una pieza sana (izquierda) y una pieza deteriorada (derecha) (Kasal, Tannert 2011)

En el caso de la medición in situ de una estructura real, la posibilidad de provocar una vibración libre se ve reducida. Habitualmente, los elementos portantes se encuentran empotrados, apoyados y conectados o embebidos en otros elementos constructivos, inhabilitando la transmisión de las ondas de impacto de forma libre. Sin embargo, existen estudios recientes de aplicación en estructuras reales con muy buenos resultados, aunque para realizar las mediciones haya tenido que desmontarse la estructura, como el caso de los elementos de madera que componen la tumba de Yu de la Dinastía Ming (Liao, Zhang et al. 2015).

Existen más publicaciones acerca de la medición de la elasticidad de los elementos de madera a través de las vibraciones inducidas, pero en casi todos los casos se refieren a los análisis en los laboratorios (Feng Hai-lin, Li Guang-hui et al. 2010, Halabe, Bidigalu et al. 1997, Pellerin, Ross, Brancheriau, Baillères 2002, Wang, Ross et al. 2001) y en ocasiones se ha implantado entre las técnicas útiles para clasificar la madera a nivel industrial.

En este punto, se remiten los resultados obtenidos por Iñiguez González en su Tesis Doctoral para clasificación de la madera estructural mediante técnicas no destructivas, donde obtuvo valores de los módulos elásticos dinámicos mediante la velocidad de propagación de ultrasonidos y mediante el métodos de vibración inducida (Iñiguez 2007). Este investigador, realizó numerosos ensayos en varias especies de pinos (radiata, silvestre y nigra). En lo que se refiere a esta tesis solamente se exponen los resultados para le pino radiata, comparando las mediciones dinámicas con su módulo elástico global paralelo a la fibra.

Tabla 5.2

Valor medio y coeficiente de variación del módulo de elasticidad estático y dinámico según el tamaño de la sección y el método empleado para la medición (Iñiguez 2007)

| Especie | Sección | E_{glo} (mecánico) | | E_{din} (ultrasonidos) | | E_{din} (vibración) | |
|----------------------|-----------|----------------------------------|----------|----------------------------------|----------|----------------------------------|----------|
| | | Valor medio (N/mm ²) | C.V. (%) | Valor medio (N/mm ²) | C.V. (%) | Valor medio (N/mm ²) | C.V. (%) |
| <i>Pinus radiata</i> | 150 x 200 | 8111 | 19,3 | 11704 | 16,2 | 10227 | 19,2 |
| | 150 x 250 | 9968 | 15,7 | 12405 | 13,2 | 10128 | 14,4 |
| D. Don | total | 9009 | 20,2 | 12045 | 15,0 | 10179 | 17,0 |

C.V.: Coeficiente de Variación

Estos resultados muestran que, tanto por emisión de ondas acústicas como por vibraciones inducidas, el valor del módulo elástico dinámico es ligeramente más alto que el estático, calculado mediante un proceso mecánico en una máquina de ensayo.

A nivel nacional investigadores en el mundo de la caracterización de la madera han desarrollado también algunas investigaciones con este método (Arriaga, Iñiguez et al. 2012). En la Escuela de Ingenieros de Montes de Palencia se han realizado, y continúan realizando, ensayos con el chopo y el pino silvestre (Casado, Acuña et al. 2007, Casado, Escudero et al. 2009). Apellidos como Carballo, Hermoso y Fernández-Golfín firman algunas de la aplicaciones de las técnicas vibratorias en otras especies de pinos, en el radiata y en el pinaster presentadas en distintos congresos (Carballo, Hermoso et al. 2007, Carballo J, Hermoso E, Fernández-Golfín JI 2008).

Radiografía por Rayos X y Rayos gamma (X and gamma rays)

Los rayos X y gamma, son los de menor longitud en el espectro de ondas, están por debajo de la luz visible y de los rayos ultravioleta teniendo en cuenta la longitud de la onda (Figura 5.10). Cuanto menor sea la longitud de la onda, mayor es frecuencia, y por tanto, su energía y su capacidad de penetración. Este tipo de ondas electromagnéticas, también denominadas ionizantes, son las fuentes de radiación más habitualmente utilizadas en la radiografía. La emisión de estos rayos relaciona la atenuación de la onda con las variaciones de densidad en el material analizado. La atenuación, o pérdida de intensidad, depende de la composición del material (densidad y espesor). Esas variaciones

de densidad son provocadas muchas veces, por deterioros e irregularidades internas y son discernibles en una radiografía (Lechner, Sandin et al. 2013).

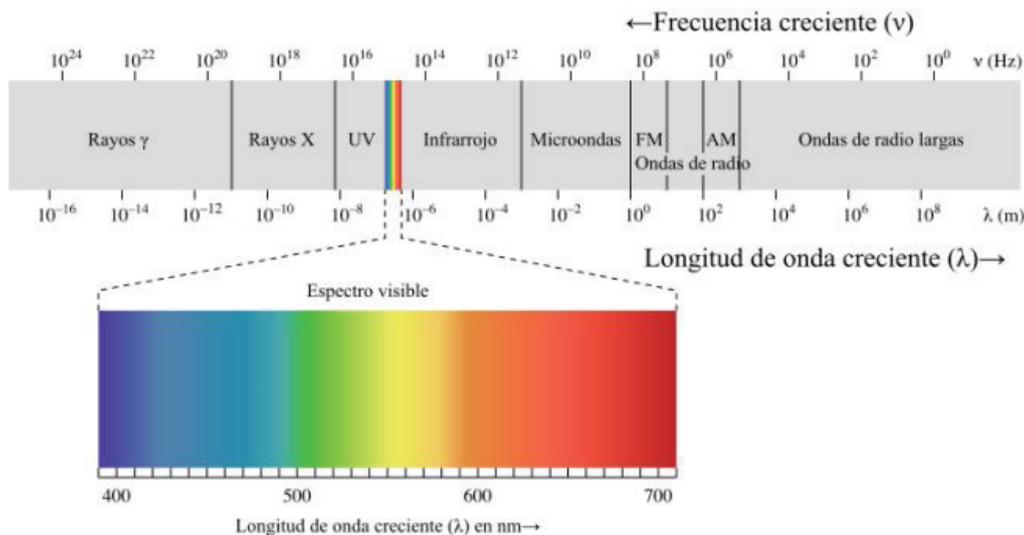


Figura 5.10

Espectro de ondas ordenado de izquierda a derecha, de menor a mayor longitud de onda (λ)

(Fuente: Wikipedia)

La densidad es una de las propiedades que caracteriza a la madera y tiene efecto sobre las propiedades dieléctricas de la madera (Vermaas 1973), sirviendo los rayos X y gamma para inspeccionar los elementos con eficiencia y rapidez en un proceso de caracterización. En general, las propiedades dieléctricas aumentan si el valor de la densidad es alto. A las técnicas que emplean este tipo de rayos son denominadas también densitométricas, consistiendo en la emisión de una radiación a través de la pieza, y en función de la capacidad de absorción de la madera, se mide la energía que ha pasado al otro lado en forma de imagen (Figura 5.11). El nivel energético, el tiempo de exposición o la distancia en entre el equipo de radiografía y el objeto y la placa, permiten identificar diferentes densidades y singularidades en la madera (Figura 5.12).

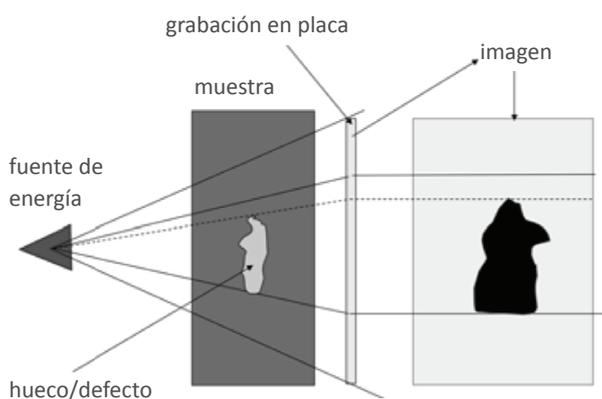


Figura 5.11

Funcionamiento general para la obtención de una imagen radiográfica (Kasal, Tannert 2011)



Figura 5.12

Imagen radiográfica de un tronco (Aguilera, Ramos et al. 2002)

Figura 5.13
Puesta a punto de un equipo de rayos X para ser utilizado in situ (Lear 2006)



Como ocurre habitualmente, estas técnicas fueron desarrolladas primero en los laboratorios (Aguilera, Ramos et al. 2002) y posteriormente ha sido aplicada en el ámbito de la evaluación de las estructuras de madera. Existen equipos para ser utilizados in situ, si bien es cierto que la técnica proporciona muy buenos resultados, los equipos son caros y de empleo cuidadoso para su uso común por la agresividad de las ondas electromagnéticas emitidas (Figura 5.13).

Termografía infrarroja (*Infrared thermography*)

Esta técnica no destructiva permite obtener datos acerca de las temperaturas de los elementos según la radiación que éstos emiten. La tecnología infrarroja se mueve en otro rango de longitud de onda, entre 0,75 y 10 μm , entre la luz visible (color rojo) y las microondas y fue descubierta a principios del siglo XIX. La termografía infrarroja se encuentra dentro de los métodos electromagnéticos y se basa en la teoría de todos los materiales emiten una radiación en función de su temperatura y de su emisividad, pudiendo ser medida con ayuda de una cámara termográfica. De este modo se pueden distinguir los distintos materiales, distintas densidades (López, Basterra et al. 2013) e incluso los elementos ocultos. La conductividad de la madera y su densidad están íntimamente relacionadas, ayudando a distinguir especies y estados de conservación a través de las imágenes tomadas por este tipo de cámaras (López 2010).

En el siglo XX la tecnología avanzó considerablemente, en parte por motivación militar. En la Primera Guerra Mundial se patentó el primer sensor infrarrojo para detectar icebergs. Y durante la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron distintas aplicaciones de la termografía infrarroja como sistema de detección. Enseguida se produjo el salto al campo de la ingeniería y la tecnología y se empieza a comercializar en distintos países (EEUU, Suecia, Noruega, Alemania) a finales del mismo siglo.

Hoy en día, esta tecnología es útil en varios campos del conocimiento, y también ha sido incluida entre las técnicas de evaluación estructural in situ de los elementos portantes de madera. Para esta aplicación se utilizan cámaras portátiles y relativamente sencillas de manejar, permitiendo visualizar grandes superficies de manera clara (Figura 5.14).

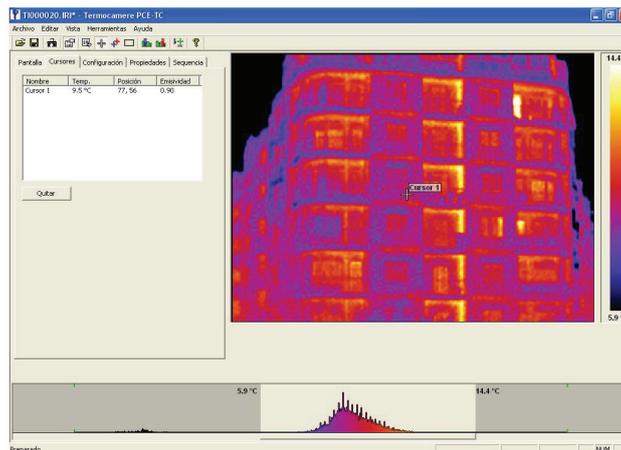


Figura 5.14
Cámara termográfica e imagen termográfica de la fachada de un edificio

La inspección termográfica en los edificios puede hacerse de manera pasiva o activa. La termografía pasiva toma una única imagen del elemento analizado, mientras que la activa realiza un seguimiento del proceso de calentamiento o enfriamiento mediante una serie de imágenes o un video. En el primer caso, se pueden distinguir los elementos que generan o conducen tanto calor como frío, dando resultados cualitativos. En el segundo caso, es necesario un aporte externo de calor o de frío en el elemento objeto de estudio, pudiendo registrarse valores cuantitativos en el proceso de cambio de temperaturas. Esta técnica funciona correctamente cuando existe una amplia diferencia de temperaturas entre el objeto analizado y el ambiente (Sánchez-Beitia Material no publicado).

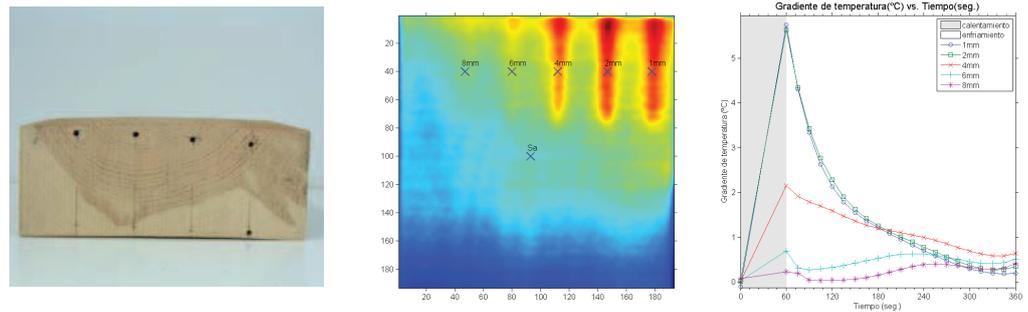
Se trata de una técnica en auge y muy prometedora, por lo que las aplicaciones de la termografía infrarroja son cada vez más. Se tiene conocimiento de aplicaciones para la determinación de emisividades, densidades, detección de daños ocultos y otras singularidades y para detectar humedades (López, Basterra et al. 2014).

Determinación de emisividades. Físicamente, todos los cuerpos irradian energía por encima del valor del cero absoluto de temperatura (-273°C) y su longitud de onda varía en función de la temperatura. Si la longitud de onda se encuentra entre 700 y 1200 nm puede registrarse su acción sobre emulsión fotográfica sensible al infrarrojo. Si la longitud de onda se halla por encima de los 1200 nm y hasta 1.000.000 nm su acción se registra electrónicamente mediante la termografía. De este modo, y tras analizar distintas especies en los laboratorios, puede determinarse la emisividad correspondiente a cada tipo de madera para identificarla.

Determinación de densidades. Tanto la conductividad del calor de la madera como la temperatura en la superficie de un elemento de madera dependen de su densidad. El dato sobre la densidad aporta información acerca de la especie o clase de madera y del estado de conservación, ya que una madera deteriorada tiene menos densidad que una madera sana.

Detección de daños ocultos y otras singularidades. Las discontinuidades en la madera son visibles en la superficie, sin embargo los daños internos no se perciben en una inspección visual. Se alude al trabajo de Gamaliel López Rodríguez, quien ha realizado una profunda investigación acerca de las distintas aplicaciones de esta técnica (López 2010). Entre sus estudios ha realizado varios ensayos en probetas a las que previamente se les había realizado perforaciones de distintos diámetros y a distintas profundidades con respecto de la superficie, con el fin de estudiar sus comportamientos (Figura 5.15).

Figura 5.15
 Probeta de ensayos con distintas perforaciones (izquierda), la imagen termográfica recogida (centro) y la evolución temporal de contraste térmico (derecha) (López 2010)



Detección de humedades. El contenido de humedad en la madera afecta a su temperatura haciendo que descienda sistemáticamente, y reflejándose con claridad en las termografías. El descenso de la temperatura supone un aumento de la emisividad, la inercia térmica y la conductividad.

Emisión de microondas (Microwaves)

Las microondas son ondas electromagnéticas ubicadas, según su frecuencia en el espectro, por debajo de la radiación infrarroja. Sirven para medir algunas propiedades de la madera, como son el contenido de humedad o la densidad. La madera puede considerarse un material dieléctrico o de baja conductividad eléctrica, que permite la propagación de microondas a través de sí. Ante una determinada frecuencia (variando entre 3 GHz y 300 GHz, según la fuente utilizada) y una temperatura conocida, la permitividad de la madera al paso de estas ondas depende de numerosos parámetros de la madera: contenido de humedad, densidad y dirección de la fibra. Como otras muchas propiedades de la madera, las dieléctricas también son anisotrópicas y varían en función de la dirección en la que se estudie el elemento, axial, radial o tangencial. Un rayo en esta longitud de onda (alrededor de 0,01 m) produce un cambio de polaridad al pasar a través de la madera, se atenúa y pierde su energía al almacenarse parte en la madera, y se traduce en un cambio de fase.

Generalmente, para la realización de este tipo de ensayos, el objeto de estudio debe colocarse entre dos antenas, una que emite las microondas y otra que las recibe. Aunque también pueden colocarse las dos antenas frente al material. Resulta de gran interés la aportación de Schajer y Orhan (Schajer, Orhan 2006) para la aplicación de esta técnica en elementos de madera. En su publicación estudian el prototipo de un sistema de emisión de microondas (Figura 5.16),

emitiendo a 10 GHz, a través del cual es posible medir simultáneamente la densidad, el contenido de humedad y la dirección de la fibra del elemento analizado.

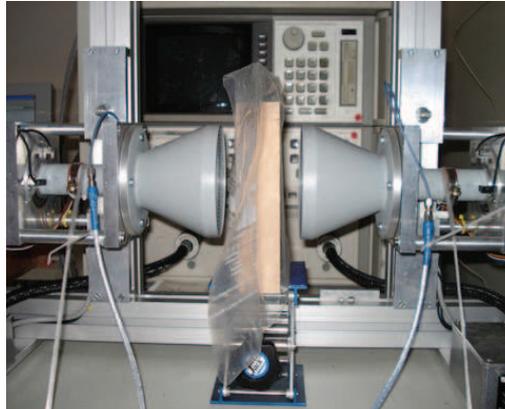
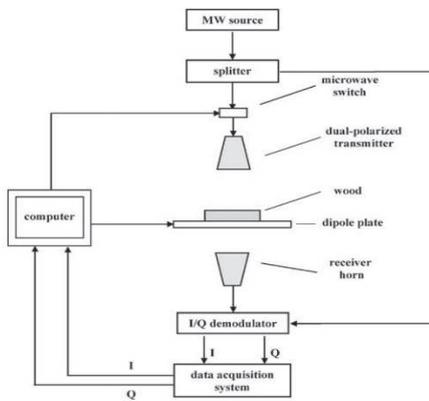


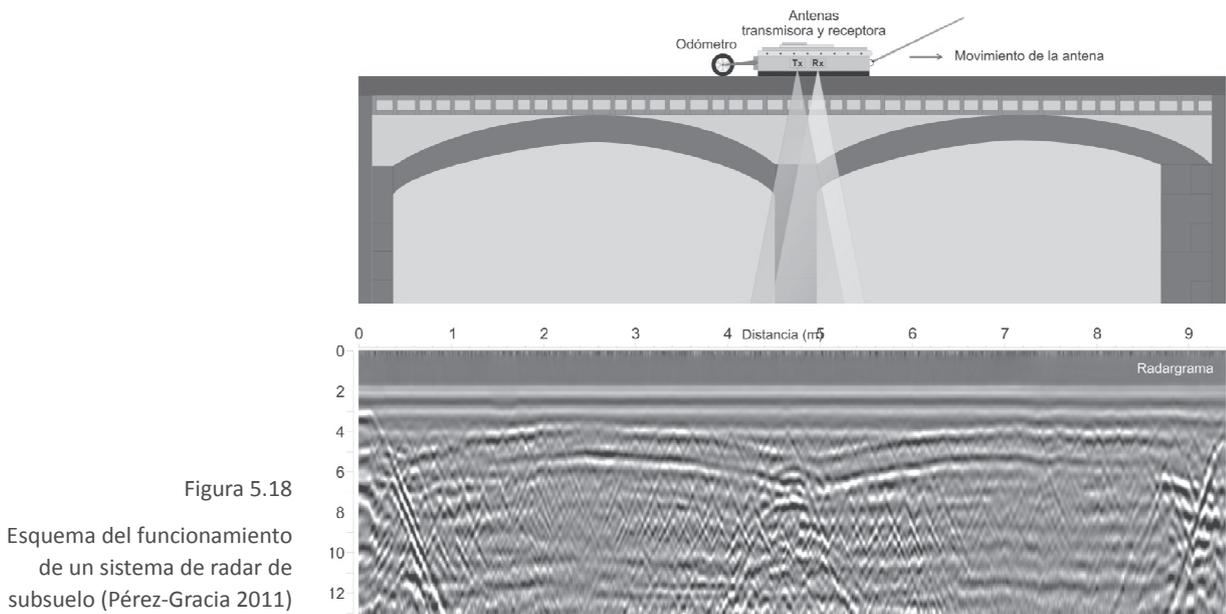
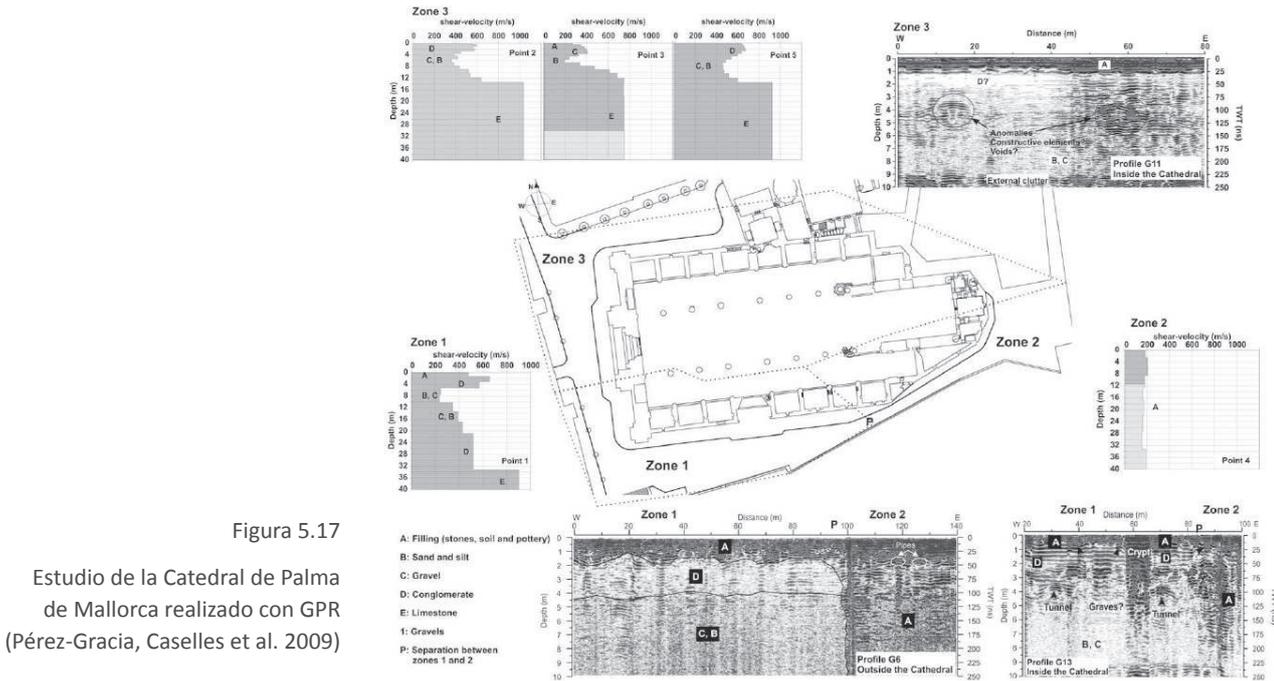
Figura 5.16
A la izquierda, diagrama esquemático del sistema ideado por Schajer y Orhan (Schajer, Orhan 2006) y a la derecha, fotografía de un ensayo por microondas sobre una muestra de madera de picea (Aichholzer, Arthaber et al. 2013)

Las primeras aplicaciones de la emisión de microondas en madera datan de mediados del siglo XX (James, Hamill 1965, Tinga 1969). Hoy en día, además del de los de Schajer y Orhan, existen otros estudios aplicando microondas para determinar las propiedades de la madera con resultados muy interesantes y sin causar daño a la madera (Sahin, Ay 2004, Kol, Yalcin 2015, Aichholzer, Arthaber et al. 2013).

Técnicas radar (GPR-Ground Penetrating Radar)

Las técnicas radar se ubican también el rango de las ondas electromagnéticas dentro del espectro de las microondas y las radiofrecuencias. El georradar, como se conoce también esta técnica, tiene muchas aplicaciones en diversos campos: en los geológicos, medioambientales y de ingeniería civil, así como en estudios de caracterización de yacimientos arqueológicos (Pérez-Gracia 2001). En los últimos tiempos, la técnica ha sido introducida también el mundo de la inspección y diagnóstico de daños en edificios del patrimonio histórico y cultural (Figura 5.17). Existen además estudios específicos sobre estructuras de madera, resultando esta técnica entre las de mayor proyección científica a nivel internacional.

Su aplicación se remonta a los años 50 del siglo pasado y su puede utilizarse para analizar elementos en distintas profundidades sin tener que realizar excavación alguna. Es de gran utilidad en trabajos arqueológicos y geológicos. Aunque sus aplicaciones van alcanzando cada vez más disciplinas. En arquitectura ha servido para detectar humedades en el subsuelo, determinar profundidades en diferentes estratos o espesores de cimentación en las diagnosis de edificios históricos (González-Drigo, Pérez-Gracia et al. 2008, Pérez-Gracia, García et al. 2008, Pérez-Gracia, Canas et al. 2000, Pérez-Gracia, Caselles et al. 2009).



La técnica se basa en el análisis de las reflexiones de impulsos electromagnéticos. Una antena situada en la superficie del elemento estudiado transmite una onda de muy alta frecuencia que se propaga al interior y es parcialmente reflejada en las interfases donde existe un contraste dieléctrico (Figura 5.18).

En España, se está desarrollando una importante labor de investigación en la puesta a punto de esta técnica para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de las estructuras de madera (Perez-Gracia, Santos-Assuncao et al. 2014, Rodriguez-Abad 2009). El comportamiento dieléctrico de la madera

depende de muchos factores, la frecuencia del campo, la temperatura, la humedad, la densidad y la desviación de la fibra. Además la madera es un material dieléctricamente anisótropo. De modo que la variación en las señales registradas puede relacionarse con estas propiedades y con la dirección que se considere. Los equipos utilizados para estos ensayos consisten en una antena emisora, otra receptora, un sistema de control de la radiación y una unidad de registro de los datos y son más compactos que en los sistemas de radar de subsuelo. En este caso se utiliza una antena de frecuencia central.

Últimamente, aunque todavía pocas, se han realizado ya algunas aplicaciones de la técnica directamente en vigas de madera con muy buenos resultados. Muchas veces las estructuras quedan embebidas en forjados y resultan difíciles de aplicar otras técnicas. Las diferencias en las reflexiones de vigas dañadas y vigas sanas son claras en muchos casos.

Existen muchos autores con aportaciones significantes en las aplicaciones del georradar en el mundo de las estructuras de madera (Perez-Gracia, Santos-Assuncao et al. 2014, Hans, Redman et al. 2015).

5.1.2 Técnicas de evaluación in situ quasi no-destructivas (MDT- Minor Destructive Testing)

En realidad forman parte de las SDT o técnicas semi-destructivas, pero en este apartado se van a presentar aquellas que ocasionan un daño menor o muy pequeño y puntual al elemento objeto de estudio. Estas técnicas cubren el espacio existente entre las no-destructivas y las totalmente destructivas, sin afectar a la integridad ni a la capacidad portante del elemento estructural. Por eso también son conocidas como *Minor Destructive Testing* (MDT). En algunas literaturas también se pueden entender como quasi-NDT (Lechner 2013). Normalmente requieren la extracción de una parte pequeña del material o la penetración con agujas o brocas de diámetros pequeños. Dentro de la caracterización del material se pueden considerar directamente no-destructivas, pero si van a ser aplicadas en una estructura existente, con el objetivo de la conservación, resulta más correcto denominarlas MDT.

Resistencia a la penetración (*Resistance drilling*)

Se trata de determinar la densidad relativa de la madera mediante la resistencia a la penetración de agujas o brocas de pequeños diámetros. Esta medida sirve para determinación de especies o clases resistentes como para la detección de deterioros o daños por xilófagos en comparación con la densidad en las partes sanas. De modo que puede constatarse un mal estado de conservación en función de la resistencia que presente el material a la penetración. En general, a mayor facilidad de penetración, mayor grado de afección, y menos densidad. En este grupo se ubican tanto el Penetrómetro como el Resistógrafo.

Penetrómetro

Este dispositivo mecánico dispara la punta de una varilla metálica (\varnothing 2,5mm) con una energía constante y conocida, impelida por un muelle, contra la superficie de la madera que se desea testear. La magnitud observable y medible es la profundidad de penetración que ha alcanzado la aguja. El valor de la profundidad alcanzada está relacionado con la resistencia que presenta el material a la penetración. A su vez, la resistencia es función de la dureza del elemento portante y, por consiguiente, de su densidad.

Se trata de un sondeo rápido, puntual y superficial (máx. 40 mm de penetración), de fundamentos muy sencillos pero que es de gran utilidad en aquellos casos en los que no es posible desmontar la estructura o extraer una muestra y ensayarla en laboratorio. Entre sus ventajas cabe destacar que es un aparato portátil, relativamente ligero y de fácil manejo, dando valores numéricos de la dureza. En la Figura 5.19 se muestran los componentes de un equipo convencional.

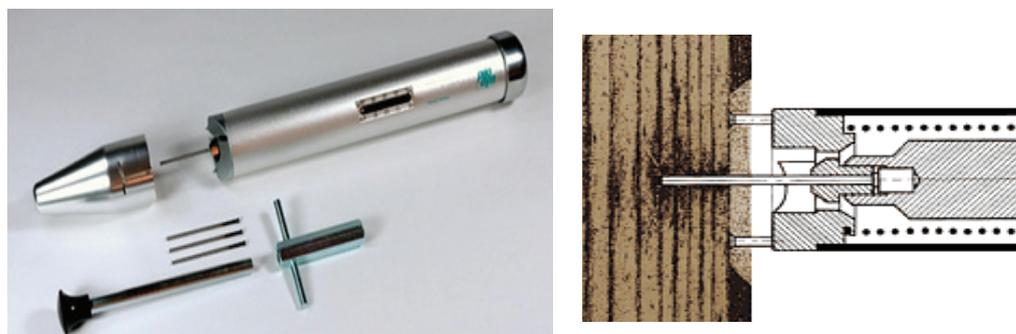


Figura 5.19

Penetrómetro Pilodyn 6 J

(Fuente: www.proceq.com)



Figura 5.20

Aplicación del penetrómetro
en una estructura existente

(Palaia 2014)

Se debe mencionar que esta técnica puede ser útil, alternativamente, para detectar patologías y deterioros superficiales en las estructuras en servicio. Un daño puntual, una pudrición, humedad, etc. afectan a la densidad del material y a la penetración de la aguja de acero que porta el equipo. En general puede decirse que una excesiva facilidad de penetración indica la posible presencia de alteraciones. El proceso de captación incluye diversas catas estableciendo una comparación entre las resistencias a la penetración en diversas zonas del elemento de interés.

En sus inicios esta técnica estaba destinada a determinar densidades de la madera en árboles vivos (Cown 1978). En España, Bobadilla y otros investigadores (Bobadilla, Esteban et al. 2007, Maldonado, Íñiguez et al. 2009) pusieron a punto la técnica para estimar la densidad de distintos pinos mediante la aplicación del penetrómetro y del arrancador de tornillos, otra técnica de evaluación de densidades, y relacionarla posteriormente con el

módulo elástico dinámico utilizando un equipo de ultrasonidos. Por su parte los autores Piazza y Riggio, recientemente han utilizado el penetrómetro en la inspección de estructuras antiguas en el que aseguran que su tamaño y manejabilidad facilitan su utilización in situ (Riggio, Anthony et al. 2014). Resulta interesante, por cuanto se refiere a la diagnosis de un edificio real (Figura 5.20), el trabajo de Palaia sobre la aplicación y los resultados obtenidos en un ejemplo de aplicación (Palaia 2014).

Se vuelve a hacer alusión a la Norma española UNE 41809 cuyo título es “Estructuras de madera existentes. Uso del penetrómetro para diagnóstico de los elementos de madera en edificios existentes”. Esta Norma fue publicada en el año 2014 y queda patente que la normalización y el uso de estas técnicas están abriendo un camino en la evaluación de las estructuras de madera existentes.

Resistógrafo

El resistógrafo es un equipo, similar a un taladro, en el que una broca muy fina y larga (\varnothing 1,5 mm y 400 mm de longitud) atraviesa un elemento estructural a una velocidad constante. La resistencia a la penetración que presenta la madera al paso de la broca se relaciona con las variaciones de potencia en el motor para mantener una velocidad constante. En las zonas más blandas (menos densas por pudriciones, oquedades, fendas, etc.) la broca pasa con mayor facilidad que en las duras (en principio de mayor calidad). El equipo registra esas variaciones a su paso por el elemento testeado, generando un resistograma a escala 1:1, en documento papel o digital. El resistograma es un gráfico en el que se representa la energía consumida por el motor al paso de la broca (Figura 5.21). Es decir, la dureza del material y en consecuencia, la densidad. Es una técnica muy precisa puesto que en el resistograma pueden incluso apreciarse las diferencias entre la madera de verano (más dura) y la de primavera (más blanda), es decir, los anillos de crecimiento.

Al igual que con el penetrómetro, algunos estudios de aplicación de esta técnica están dirigidas a la medición de densidades y detección de daños internos de la madera viva o de los árboles en pie (Bethge, Mattheck et al. 1996, Song Shiquan, Xu Huadong et al. 2011, Gao, Wang et al. 2012, de Almeida Rollo, Soave Junior et al. 2013). El primer útil comercial se denominó “Densitomat”, que en 1993 tomó su nombre actual, resistógrafo y fue diseñado por Rinn (Rinn, Schweingruber et al. 1996, Rinn 1996b). La técnica también ha servido, en combinación con otras,

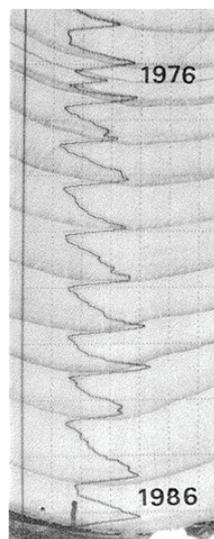


Figura 5.21
Resistograma en el que se aprecian las diferencias de densidades entre anillos de crecimiento (Rinn 1996a)



Figura 5.22
Aplicación del resistógrafo en un árbol vivo
(Fuente: www.rinntech.de)

para la inspección de obras civiles, como postes y puentes (Brashaw, Vatalaro et al. 2005).

Los equipos portátiles existentes en el mercado son relativamente pesados y su utilización requiere de cierta experiencia. No obstante, debido a la longitud de la broca, la técnica tiene la ventaja de poder hacer mediciones en profundidad, no solo superficiales. Permite, además, obtener resistogramas de partes inaccesibles de la estructura, como testeros de vigas empotradas en un muro, resultando de gran interés para el estudio de las estructuras existentes. Aunque se trata de una técnica puntual (Figura 5.23), requiriendo la realización de más de un sondeo en la misma pieza para determinar anomalías, la medición es muy detallada.

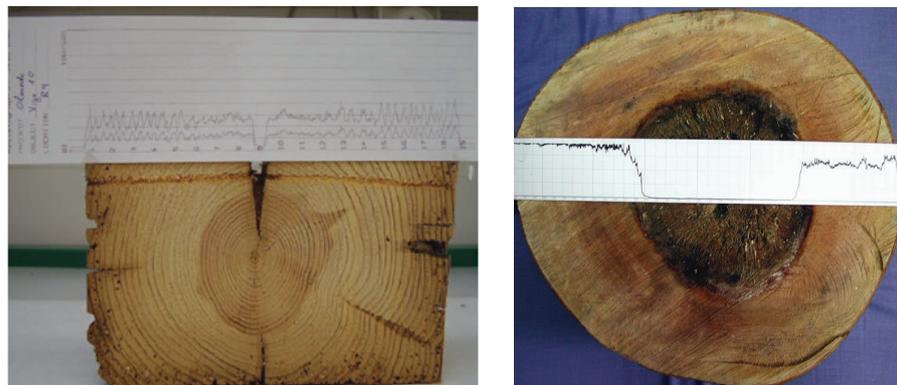


Figura 5.23

Resistogramas superpuestos a la sección donde se ha realizado el ensayo de penetración

Existen numerosas aplicaciones de esta técnica en estructuras en servicio, y por el momento se ha utilizado más para diagnosticar daños ocultos que para determinar densidades (Álvarez, Basterra et al. 2005, Basterra, Acuña et al. 2009, Imposa, Mele et al. 2014).

Extracción o arranque de tornillos (*Screw withdrawal*)

Esta técnica puede considerarse inversa a las dos anteriores, penetrómetro y resistógrafo. Aunque el objetivo sea el mismo, no es un método de penetración sino de extracción. El ensayo consiste en introducir un tornillo a una determinada profundidad en la zona de interés para posteriormente extraerlo mediante un dispositivo capaz de medir la fuerza máxima que ha sido necesaria para llevar a cabo esa extracción (Figura 5.24). Es decir, se trata de medir la resistencia que ha presentado el material a la extracción y relacionarlo con su densidad. Cuanto mayor sea la resistencia al arranque del tornillo, más denso será el material y, en consecuencia, los módulos de elasticidad (rigidez) y de rotura (resistencia) también serán mayores. Resulta de interés la obtención del valor de la densidad in situ, igual que se indicó con el penetrómetro y el resistógrafo, ya que mediante la correcta formulación matemática y en combinación con alguno de los métodos acústicos, puede relacionarse con el módulo elástico dinámico (Bobadilla, Esteban et al. 2007). Conocida en castellano como arranque de tornillos, esta técnica proporciona una medida local y puntual

por lo que se precisa de la realización de varias medidas en diferentes puntos tomando como válido el valor medio. Se conocen aplicaciones para determinar el estado de conservación del elemento aunque la medida es relativamente superficial, limitándose a la longitud del tornillo que sea introducida. En general, una mayor resistencia a la extracción indica una mejor calidad de la madera. El instrumento consta de un husillo para la extracción accionado manualmente y un transductor capaz de registrar la fuerza máxima necesaria para la extracción. Habitualmente se emplean tornillos de diámetro 4 mm, introduciendo 18 mm de longitud en el elemento de madera.

La fuerza de extracción, dependiendo de las dimensiones de los tornillos que se extraigan, responde a la siguiente ecuación:

$$p = 108,25 \cdot \rho^2 \cdot \phi \cdot l$$

Siendo:

- p Fuerza de arranque (N)
- ρ Densidad de la madera (kg/m^3)
- ϕ Diámetro del tornillo introducido (mm)
- l Longitud del tornillo introducido (mm)

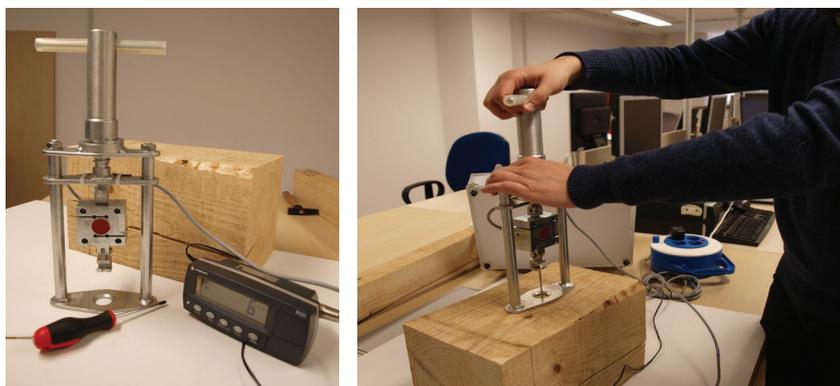


Figura 5.24
Imágenes de un *screw withdrawal* o extractor de tornillos convencional

Extracción de probetas (*Core drilling/Tension micro-specimen/fractómetro*)

Las técnicas de extracción de probetas son más invasivas que las de penetración o que el extractor de tornillos. Se trata de extraer muestras pequeñas, con el fin de evitar singularidades (nudos, desviación de la fibra, fendas, etc.) y daños en la integridad del elemento de origen, y someterlas directamente a una serie de tensiones. Existen distintos tipos ensayos para examinar las propiedades mecánicas en función del tipo de probeta y de la tensión que se le aplique. El estudio de las propiedades mecánicas mediante probetas es directo, es decir, que no se trata de medir otros parámetros observables y correlacionarlos

propiedades mecánicas. Sin embargo, las probetas son pequeñas y, a menudo, poco tienen que ver con las propiedades de los elementos de tamaño estructural.

Core Drilling

La técnica de *Core Drilling* consiste en la extracción de una probeta cilíndrica en la dirección radial del tronco, de diámetro variable dependiendo del equipo que se utilice (Figura 5.25). En estos ensayos la probeta es sometida a una fuerza de compresión para medir su resistencia y su módulo de elasticidad. La extracción es puntual dando una información localizada sobre las propiedades mecánicas de una pieza. La premisa es extraer probetas pequeñas con el fin de evitar daños en el elemento estructural del que se extraiga la muestra, de modo que el agujero que deja la extracción sea menor que un nudo. Se aconseja tapar el agujero tras la extracción para evitar que entre la humedad o los insectos y preservar la apariencia del elemento.

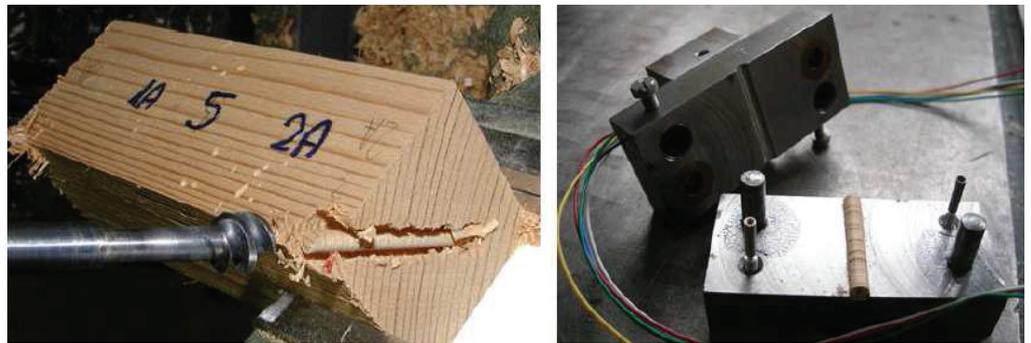


Figura 5.25

Extracción de una probeta radial y su posterior testeo a compresión (Tannert, Anthony et al. 2014)

Esta es una técnica comenzó a utilizarse para caracterizar productos forestales en el *State Forest Products Research Laboratory* en Bratislava, y fue mejorada por Kasal (Kasal 2003), quien suma numerosas aportaciones en distintas técnicas de evaluación de estructuras de madera (Kasal, Anthony 2004, Kasal, Tannert 2011, Kasal 2013, Kasal 2014). Esta técnica aporta datos sobre la resistencia de una determinada especie de madera a una determinada solicitación y así ayudar a su caracterización y clasificación dentro de una clase resistente. Existe una norma de la *American Society for Testing and Materials*, ASTM D143-94 E1 en la que se dan especificaciones acerca de cómo deben ser las probetas y la realización del ensayo.

Sin embargo, existe una limitación y es que la muestra extraída debe ser sana y libre de defectos, evitando las partes deterioradas y demás singularidades, alejándose de la realidad de las estructuras en servicio. Esa misma probeta puede servir para ser examinada por otras técnicas en el laboratorio, pudiendo definir la especie con ayuda de un microscopio o realizar un análisis dendrocronológico.

Tension micro-specimen

En este caso la probeta es de sección transversal triangular y extraída de la superficie del elemento. Los cortes realizados para la obtención de la probeta deben ser paralelos a las fibras de la madera, de modo que la dirección longitudinal de la probeta coincide con esa dirección. En este caso se realiza un ensayo de tracción para deducir las propiedades mecánicas de la madera. Para la extracción de estas micro-probetas se utiliza una sierra radial a la que se acopla un dispositivo que permite el corte óptimo para el ensayo (Figura 5.26). Al igual que en la anterior, las muestras son extraídas in situ del elemento objeto de estudio, pero no dejan de ser probetas pequeñas, en comparación con el tamaño estructural de la pieza de origen y que deben ser estudiadas en el laboratorio, aunque la extracción se haya llevado a cabo en el propio edificio.

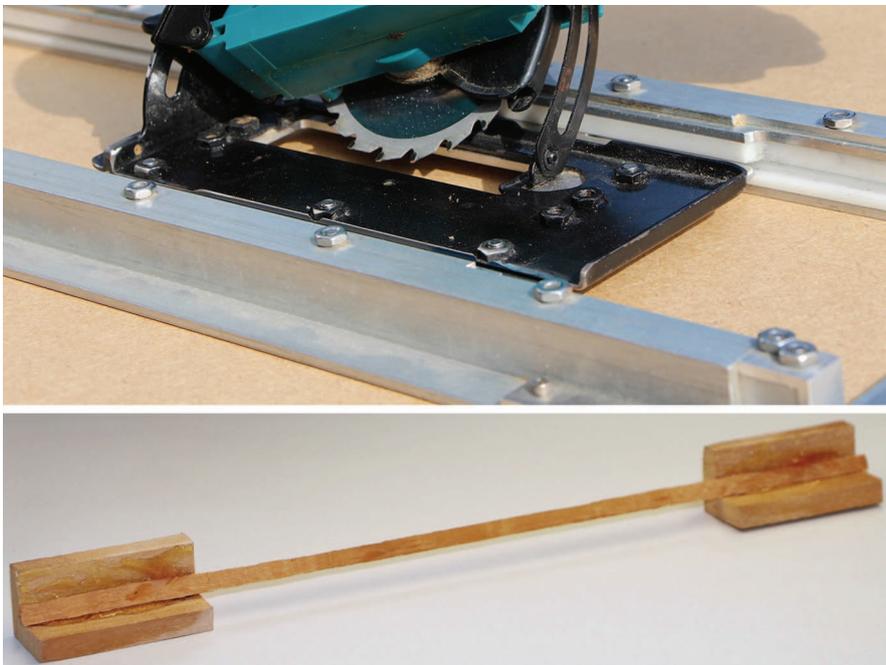


Figura 5.26

En la imagen superior, sierra radial dispuesta para la extracción de una probeta y, en la inferior, la probeta extraída adherida a unos tacos de madera que permitan someter la pieza a tracción (Tannert, Anthony et al. 2014)

Fractómetro

El fractómetro es un dispositivo portátil mediante el cual se pueden averiguar los coeficientes de la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad radial a flexión y la energía de rotura. Al igual que en las anteriores, esta técnica requiere de la extracción de una probeta o testigo similar al utilizado en el ensayo de Core Drilling, de 5 mm de diámetro y extraída en la dirección radial del tronco. Se conocen aplicaciones en árboles en pie, pero no específicamente para evaluar las características de elementos portante de madera.



Figura 5.27 Fractómetro (Fuente: IML)



Dendrocronología (Dendrochronoly)

Otra técnica que también necesita extraer una pequeña probeta cilíndrica es la dendrocronología. El propio nombre indica la relación existente entre los anillos anuales de crecimiento de los árboles y el tiempo (del griego *dendron* -árbo-, *cronos* -tiempo- y *logo* -conocimiento-). Esta disciplina científica está dotada de un conjunto de principios, técnicas y métodos que permiten datar los anillos de crecimiento anuales y relacionarlos con ciertos factores que han influido en ese crecimiento (Merino 2009).

El objetivo no es tanto el estudio de las propiedades de la madera, sino establecer unas cronologías o series maestras para cada especie botánica y para cada climatología, identificando y datando los anillos en el año exacto en el calendario. La cronología empieza datando un árbol vivo, cuyo último anillo de crecimiento corresponde al presente año y se continúa la secuencia hacia atrás, datando elementos estructurales y madera arqueológica, que se encuentra enterrada o sumergida (Figura 5.28).

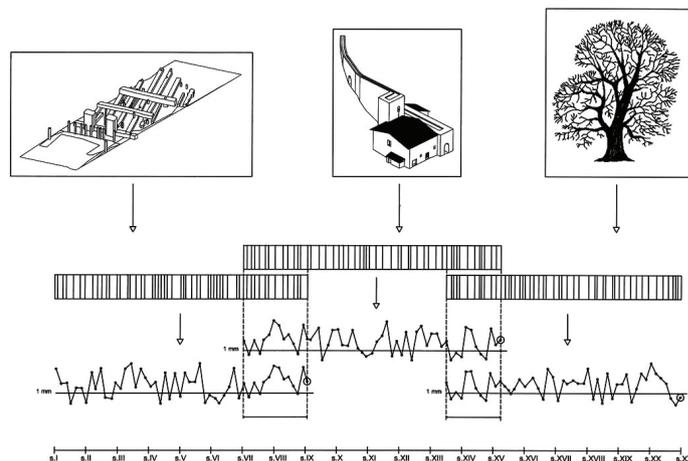


Figura 5.28
Representación de la datación de la madera
(Fuente: Arkeolan)

Es una técnica muy precisa y de gran utilidad para datar edificios históricos y asegurar la originalidad de los elementos estructurales que se quieren conservar. También se puede denominar dendrodatación, cuando se trata de aplicar la ciencia en la datación de edificios históricos basándose en la edad de las estructuras de madera (Merino 2009).

El crecimiento anual de los árboles está estrechamente relacionado con la climatología del lugar. Por lo que esta técnica sirve también para la reconstrucción de climatologías históricas (Creus Novau 2000). Se muestra cierta concordancia entre individuos de la misma especie que han crecido en la misma época y en la misma zona climática. Estudiando distintos ejemplares puede crearse una serie maestra, similar a un “código de barras” (Figura 5.28), que sirve para ubicar los elementos estructurales en un periodo de una manera muy precisa. Basta con la extracción de un testigo mediante una barrena, y observarlo bajo la lente de un microscopio para poder encajarlo en la serie cronológica. Las probetas o testigos deben extraerse con cuidado y deber ser pulidos para poder visualizar



Figura 5.29
Estudio de una muestra de madera histórica en el laboratorio de Arkeolan (En la imagen de la izquierda, Josué Susperregi)

los anillos, siendo condición sin equa non que el testigo sea representativo del crecimiento del árbol y recoja un número suficiente de anillos, al menos cincuenta, para poder realizar una correcta datación (Figura 5.29).

Es una técnica que se está aplicando en la datación de edificios existentes y que está dando lugar a publicaciones muy interesantes (Fletcher, Tapper 1984, Frattari, Pignatelli 2005, Lizeaga 2010, Bernabei, Bontadi 2012), sirviendo para comprender la evolución de la arquitectura y de la construcción. Existe una norma italiana, UNI 11141, que sirve como guía para la datación dendrocronológica de elementos de madera patrimoniales. Sin embargo es una ciencia local, puesto que cada especie arbórea crece de distinta manera en función de dónde lo haga, y deberá desarrollarse una serie maestra para cada lugar. Por eso los expertos en esta técnica deben centrarse en un territorio concreto afectado por un clima concreto. La interacción entre dendrocronólogos es fundamental para abarcar la máxima información posible.

Pruebas de dureza (*Hardness tests*)

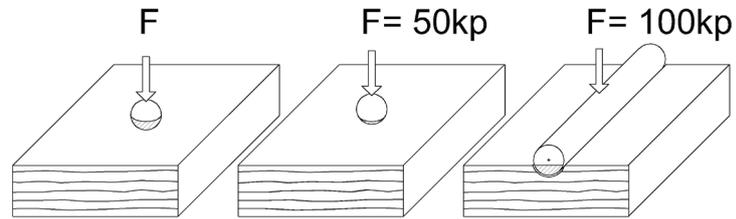
La dureza de los materiales hace referencia a la propiedad que poseen de no ser rayados en su superficie, habitualmente en función de la profundidad que haya alcanzado la hendidura realizada por un cabezal metálico (indenter). La anisotropía, la heterogeneidad y la higroscopicidad propias de la madera influyen en su dureza y también la geometría de la punta empleada para realizar la hendidura o el rayado en el ensayo. La hendidura alcanza distintas profundidades bajo la misma unidad de fuerza en función de su geometría, es decir, que no es igual hendir la madera con una bola, con punta redondeada o con una punta más afilada. La orientación de las fibras en la superficie donde se vaya a llevar a cabo el ensayo también tiene una gran influencia en la medida de la dureza.

En función de esas variables, la geometría del cabezal o de la carga aplicada, existen distintos ensayos para medir la dureza de una superficie de madera. Existen tres grupos de ensayo, por rayado, por penetración o por rebote. Los

test más habituales son los que aplican una fuerza estática, entre los que destacan el de Janka, el de Brinell y el de Monnin (Figura 5.30 y Figura 5.31) por su mayoritaria utilización en la caracterización de la dureza, sobre todo para ser aplicada en pavimentos.

Figura 5.30

Test de dureza en función del cabezal y de la fuerza aplicada, Janka, Brinell y Monnin (de izquierda a derecha, respectivamente)



Test de Janka

Esta técnica mide la fuerza que ha sido necesaria para incrustar una bola de acero de 0,444 pulgadas (11,28 mm) de diámetro exactamente hasta la mitad. La escala de Janka recoge los valores de la fuerza necesaria en distintos tipos de madera, permitiendo compararlas entre sí. Existe una norma americana ASTM D143, que en su sección 13 se refiere al test de dureza en probetas pequeñas, para la correcta realización de este ensayo.

Test de Brinell

El test de Brinell consiste en medir el diámetro de la marca imprimida por una bola de acero de 10 mm de diámetro tras aplicar una fuerza normal en la superficie de 50 kp (0,5 kN). La carga máxima es aplicada sobre la superficie de manera estática y constante durante 30 segundos. En Europa y en España se aplica la Norma UNE-EN 1534 (*Wood and parquet flooring – Determination of resistance to indentation (Brinell) – Test Method*) refiriéndose exclusivamente a los suelos de madera. El valor de la dureza según Brinell se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$H_{Brinell} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Siendo:

- P Fuerza máxima (kp)
- D Diámetro de la bola de acero (mm)
- d Diámetro de la impresión o la hendidura (mm)

Test de Monnin

Este ensayo, regulado inicialmente en Francia por AFNOR (*L'Association Française de Normalisation*) fue denominado Chalais-Meudon, basándose en las indicaciones de la NF B 51-125. En España se mide conforme a la Norma UNE 56534 (Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la dureza). En este tipo de ensayo de dureza un cilindro de acero de 30 mm de diámetro se incrusta en la superficie de la madera aplicando una carga máxima de 100 kp (1 kN).

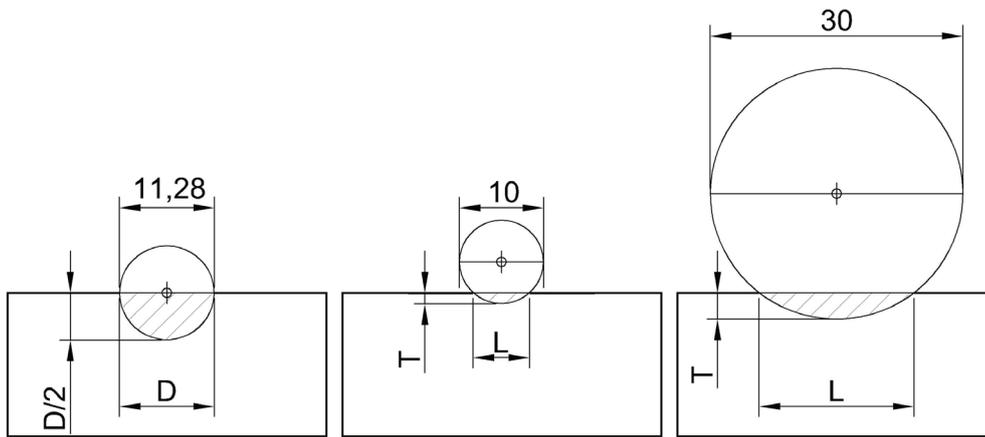


Figura 5.31
Test de Janka, Brinell y Monnin respectivamente en función del diámetro de la esfera o el cilindro y de la hendidura realizada

Existe otra herramienta que aunque habitualmente sirve para medir la desviación de la fibra además puede servir para estimar la dureza de la madera (Figura 5.32). Es una herramienta que aporta una información más bien cualitativa, pero puede servir de gran ayuda para completar la información recogida in situ. El trazador es esa herramienta que provista de una aguja inclinada sirve para hacer hendiduras en la pieza a analizar. En función de la dirección y la profundidad de la hendidura, se pueden estimar tanto la dirección de la fibra como la dureza superficial de la pieza. La utilización de este instrumento se describe en la Norma UNE-EN 1310.



Figura 5.32
Trazador convencional (UNE-EN 1310)

A veces, el penetrómetro, descrito entre las técnicas de resistencia a la penetración con el objetivo de estimar densidad (ver pág. 99), puede ser considerado entre las herramientas de estimación de dureza superficial, en ese caso aplicando una fuerza dinámica.

Resumen

La Tabla 5.3 muestra la relación entre los métodos de caracterización revisados en este capítulo y su efectividad a la hora de determinar propiedades de la madera.

Algunas de las técnicas de la tabla son válidas para caracterizar especies y definir comportamientos en el laboratorio, pero existen limitaciones para evaluar las estructuras in situ, como en el caso de las vibraciones inducidas. Otras, se solapan y se utilizan indistintamente en la caracterización de las propiedades de la madera en los laboratorios y en la inspección de estructuras en servicio o incluso en la determinación de las propiedades de los árboles en pie.

Se puede decir que, en general, las técnicas más útiles y más utilizadas para la evaluación estructural in situ son, por un lado, las que miden la resistencia a la penetración o extracción y por otro lado, los métodos acústicos (Esteban, Argüelles et al. 2007). Las primeras sirviendo para la determinación de la densidad in situ, proporcionan información del estado de conservación y

ayudan a determinar la especie. Además, en combinación con los métodos acústicos, sirven para calcular la rigidez.

Una de las líneas de investigación futuras se abre con el desarrollo y la puesta a punto de estas técnicas, tanto para la caracterización de especies como para la estimación de la madera puesta en obra. Las técnicas de la Termografía Infrarroja (López 2010) y la del Georradar (Rodríguez-Abad 2009) resultan de gran interés y se les augura un buen futuro en la evaluación de las estructuras de madera, dotando de fiabilidad y rigor al diagnóstico con sus múltiples aplicaciones.

Es de gran interés también mencionar en este apartado la Dendrocronología como una técnica fundamental si se refiere la inspección de estructuras históricas. Aunque no sirve propiamente para establecer propiedades físicas, mecánicas o elásticas de la madera, sirve para datarla. Y eso es fundamental en el proceso de restauración de una estructura histórica, y poder aseverar la antigüedad del propio edificio y diferenciar los elementos originales de los añadidos posteriormente.

Tabla 5.3

Efectividad de los métodos NDT y SDT para determinar propiedades de la madera (Riggio, Anthony et al. 2014)

| Método | Determinar especies | Humedad | Localizar deterioros | Cuantificar deterioros | Evaluar resistencia | Determinar rigidez | Identificar elementos ocultos |
|---|----------------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Inspección Visual Preliminar | Limitado | Limitado | Limitado | No | No | No | No |
| Medición de Contenido de Humedad | No | Sí | Limitado | No | No | No | No |
| Métodos Acústicos | No | No | Limitado | Limitado | No | Sí | Limitado |
| Vibraciones inducidas | No | No | Limitado | Limitado | No | Limitado | Limitado |
| Radiografía | No | Sí | Sí | Sí | No | No | Sí |
| Termografía Infrarroja | No | Sí | Sí | Sí | No | No | Sí |
| Emisión de Microondas | No | Sí | Sí | Sí | No | No | Sí |
| GPR | No | Sí | Sí | Sí | No | No | Sí |
| Resistencia a la Penetración | Limitado | Limitado | Sí | Sí | No | Limitado | Sí |
| Extracción de Tornillos | Limitado | Limitado | Limitado | Limitado | No | Limitado | Limitado |
| Extracción de Probetas | Sí | Sí | No | No | Limitado | Limitado | No |
| Dendrocronología | Sí | No | Limitado | No | No | No | Limitado |
| Pruebas de Dureza | Sí | Limitado | Limitado | Limitado | No | Limitado | No |

5.2 Técnicas de análisis estructural

Este apartado hace referencia a las técnicas específicas de análisis de la capacidad portante y de los estados de tensiones ocasionados por las cargas aplicadas, mientras que las técnicas de caracterización, descritas en el apartado anterior, se refieren más bien al material y a los estados de conservación.

En una estructura en servicio, resulta imposible descargar un elemento portante y volverlo a cargar nuevamente con una carga conocida, como ocurre en el laboratorio. El investigador debe ingeniárselas para detectar las cargas existentes pero desconocidas, sin dañar el elemento analizado, ya que en el ámbito del Patrimonio la premisa es que deben ser preservados. Estamos ante dos conceptos clave:

- Cargas ya existentes pero desconocidas
- Elementos constitutivos del Patrimonio que es preciso conservar

En la comunidad científica internacional, los métodos empleados para el análisis estructural de materiales no metálicos se basan en la eliminación de parte del material. Al extraer parte del elemento portante, las tensiones en los alrededores de la extracción se relajan completamente. En consecuencia, se originan unas deformaciones por relajación que pueden captarse mediante técnicas adecuadas. Algunos investigadores han propuesto diversos esquemas matemáticos que relacionan esas deformaciones captadas, tras la eliminación de material, con las tensiones que las originaron y que estaban soportadas por lo extraído. Existen, además, diversas normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*) y RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*) sobre la aplicación práctica de diferentes técnicas apropiadas para este objetivo. Una dificultad añadida, en este caso, es que las técnicas utilizadas fueron diseñadas para el mismo fin pero en materiales industriales y/o tecnológicos, por tanto, deben ser adaptadas para su aplicación en este campo de investigación (Sánchez-Beitia Material no publicado).

A continuación, se detallan las técnicas más usuales para los materiales empleados en las construcciones históricas: Gatos Planos o *Flat Jacks* y Hole Drilling. Ninguna ha sido utilizada en el estudio de estructuras de madera hasta la realización de esta Tesis Doctoral. Su uso, dentro del patrimonio arquitectónico, ha estado limitado a materiales que pueden considerarse isótropos y continuos como muros de piedra o la fábrica de ladrillo (Lombillo, Villegas et al. 2008, Sánchez-Beitia 2007a, Sánchez-Beitia 2007b, Sánchez-Beitia 2008, Sánchez-Beitia, Schueremans et al. 2009, Sánchez-Beitia, Schueremans 2009, Sánchez-Beitia, Roca 2014, Sánchez-Beitia 2015).

Uno de los objetivos principales de esta tesis es incluir la técnica de Hole Drilling dentro de las técnicas de aplicación in situ para la inspección de estructuras de madera (Sánchez-Beitia, Torres et al. 2012). Resulta imprescindible describir

previamente las técnicas a las que se ha hecho alusión y a sus aplicaciones habituales en otros materiales.

5.2.1 Gatos Planos (Flat Jacks)

En este apartado se describen las características de la técnica de evaluación de estados tensionales in situ mediante gatos planos, denominados *Flat Jacks* o *Single Flat Jack* en la comunidad científica internacional, así como el equipamiento necesario para llevar a cabo el ensayo. El procedimiento operativo está basado en la Normas ASTM C1196 y C1197 adaptando las especificaciones de la normativa, según la experiencia de los investigadores de la firma GEOCISA (www.geocisa.com) en el análisis estructural, y la documentación existente al respecto, como es la recomendación RILEM, denominada RILEM LUM D2. El texto forma parte de la Memoria Final del Proyecto de Investigación del Plan Nacional, denominado por su acrónimo SICEXPAR, con referencia 2000-0069-P4-02, 2000-2003, del que el director de esta Tesis Doctoral, Santiago Sánchez-Beitia, fue el Investigador Principal.

Tabla 5.4

Normativas sobre la aplicación de la técnica Flat Jack

| | |
|---------------------|---|
| ASTM C1196 | <i>Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using Flat Jack measurements</i> |
| ASTM C1197 | <i>Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using the Flat Jack method</i> |
| RILEM LUM D2 | <i>In-situ stress tests on masonry based on the Flat Jack</i> |
| RILEM LUM D3 | <i>In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the Flat Jack</i> |

Descripción conceptual

El ensayo consiste en la restitución de la deformación causada por una discontinuidad normal a la superficie del elemento en estudio. La discontinuidad se provoca mediante un corte plano realizado utilizando las fresas adecuadas. Previamente al corte, se colocan unas bases de medida, que recogerán las deformaciones posteriores producidas por la extracción de material que supone por el corte. La técnica de los Gatos Planos es ampliamente utilizada en la comunidad científica para la deducción de esfuerzos, útil únicamente en compresión uniaxial, en construcciones del Patrimonio Arquitectónico, aportando información de las cargas verticales existentes.

Para conocer el efecto de liberación de tensiones, como consecuencia del corte horizontal, se ha modelizado el comportamiento de un sillar con carga uniforme en el que se ha incluido una discontinuidad igual al corte (Figura 5.33). Se observa que en el centro de las caras de la discontinuidad la tensión disminuye hasta casi anularse; el efecto colateral a esta liberación se produce en los extremos de la misma, donde se provoca una concentración de la tensión.

El Gato Plano, como herramienta, consiste en una célula de presión de espesor reducido formado por dos placas de acero soldadas en los bordes. Las normativas y recomendaciones, relacionan las dimensiones del gato con el tamaño de la

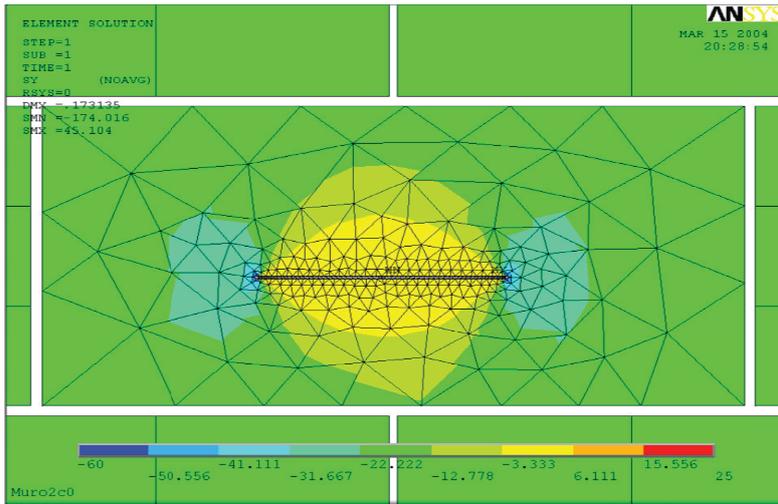


Figura 5.33

Modelización de la distribución de tensiones alrededor de una discontinuidad existente en un material sometido a carga uniforme (Sánchez-Beitia Material no publicado)

pieza que compone la fábrica, así como la forma más adecuada que debe de tener el gato, siendo la más conveniente la de sector circular puesto que, en gran medida, facilita la ejecución práctica del ensayo. Para la estimación de la tensión en un punto de la estructura, se recomienda utilizar un gato plano semicircular que cumpla un conjunto de proporciones en función de la norma aplicada. Las normas y recomendaciones relacionan las dimensiones del gato con el tamaño de la pieza que compone la fábrica con alguna diferencia entre ellas. En la Figura 5.34 se muestra un esquema de una pieza tipo, el bloque gris, y las variables dimensionales que definen tanto la pieza como el gato y las bases de medida.

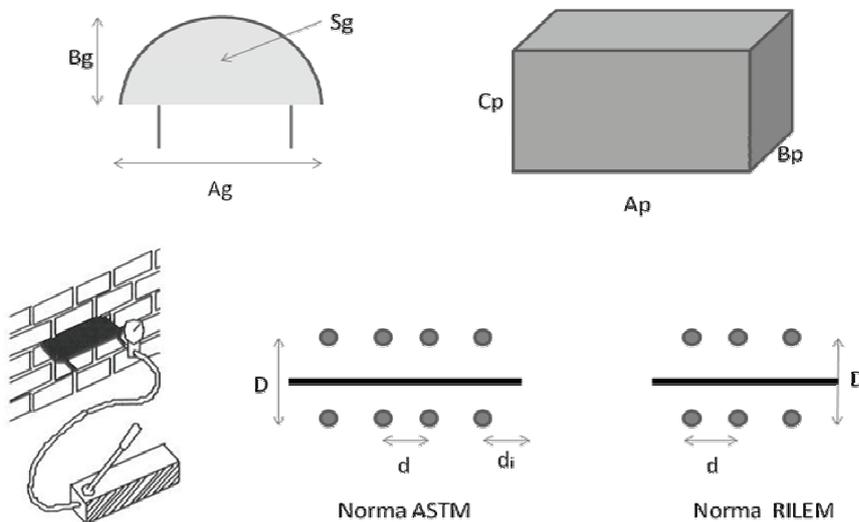


Figura 5.34

Disposición del Gato Plano en una fábrica (Sánchez-Beitia Material no publicado)

Según las dos normas y recomendaciones mencionadas, las dimensiones del gato y de las posiciones de los puntos de medida deben de cumplir las siguientes condiciones (Tabla 5.5):

Tabla 5.5

Condiciones de colocación del dispositivo de ensayo según las normas de aplicación

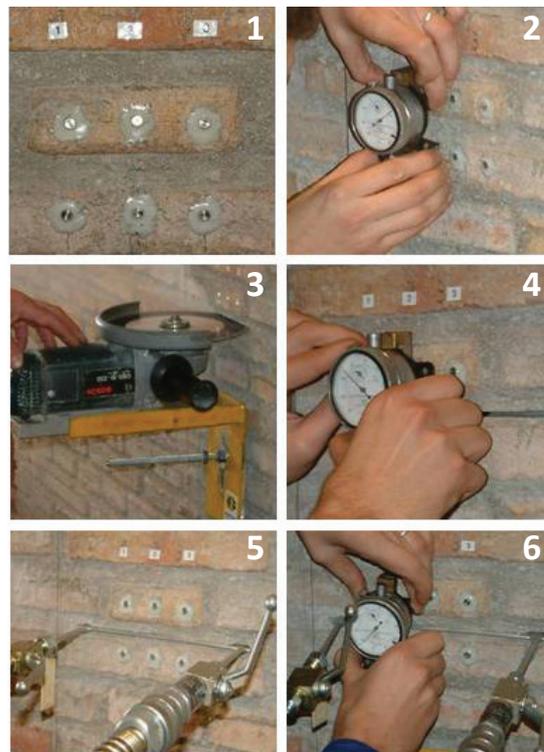
| ASTM C1196 | RILEM LUM D2 |
|-------------------|--------------|
| Ag > Ap | |
| Ag > 203 mm | |
| Bg > 76 mm | Sg > Sp |
| Bg > Bp | |
| 0,3Ag < D < 0,6Ag | |
| di = Ag/8 | |

Realización del ensayo

A continuación se describen las fases para llevar a cabo el ensayo mediante Gato Plano (Figura 5.35). En una primera fase se posicionan los puntos de control del ensayo, formados por parejas de bases de extensometría, separadas verticalmente una cierta distancia, determinada mediante un extensómetro (D_0). Una vez obtenido este dato se realiza un corte normal entre los puntos de control. Como consecuencia del corte (discontinuidad del material), los puntos de control experimentarán un movimiento de acercamiento, disminuyendo la distancia (D_c) entre los mismos respecto a la situación inicial, $D_0 > D_c$. A la diferencia entre ambas distancias se denomina “deformación liberada causada por la liberación de tensiones en la zona de corte”. Para restituir la situación tensional del elemento, se introduce el Gato Plano en el corte realizado, aumentando gradualmente la presión en el gato hasta que se alcance de nuevo la distancia inicial D_0 .

Figura 5.35

Proceso de aplicación de Flat Jack o Gato Plano en un muro de fábrica de ladrillo (Sánchez-Beitia Material no publicado)



- (1) Colocación de las bases de extensometría
- (2) Distancia inicial entre las bases (D)
- (3) Realización del corte
- (4) Medida de la deformación liberada (nueva distancia D')
- (5) Introducción del Gato Plano en el corte
- (6) Incremento gradual de la presión en el gato y control de la deformación restituida

El ensayo con Gato Plano se lleva a cabo en dos fases. En primer lugar se determina el estado tensional a compresión de la fábrica y en la segunda, las características de deformabilidad (Lombillo, Villegas et al. 2008). De modo que este proceso se repite una vez alcanzada la presión de restitución, realizando un segundo ciclo de carga. El objetivo de esta segunda carga es comprobar que el comportamiento del material es uniforme, verificando a su vez que las condiciones de ensayo han sido las adecuadas. En este procedimiento se debe atender a la recuperación de deformaciones tanto en ascenso como en descenso de presiones.

La presión en el gato plano (p) puede relacionarse con el estado tensional del muro anterior a la realización del corte. Esa tensión en el muro, en la dirección normal al plano del corte, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{muro} = p_g \cdot K_g \cdot K_a$$

Siendo:

p_g Presión comunicada al gato plano mediante la bomba hidráulica (MPa)

K_g Constante adimensional del Gato Plano

K_a Relación entre el área de contacto y el área del corte realizado ($K_a < 1$)

Las constantes de corrección, debidas a las propiedades del gato, se determinan mediante un procedimiento de calibración en laboratorio, obteniendo la relación existente entre la presión del gato y la fuerza que trasmite, tal y como se describe en el apartado siguiente.

Calibración Flat Jacks

El objetivo de la calibración es conocer la relación existente entre la presión interna aplicada en el gato y la tensión real transmitida por éste al elemento portante. La presión comunicada al gato debe ser corregida mediante una constante adimensional, propia de cada Gato Plano (K_g), y determinada en el proceso de calibrado, que refleja el área efectiva debida a su rigidez. El proceso de calibrado se describe a continuación, sirviendo la Figura 5.36 como ilustración.

En primer lugar se dispone una prensa controlada con una célula de carga, confinando el gato entre el plato superior e inferior de la prensa mediante dos placas de acero de 5 cm de espesor, a las cuales se fija un reloj comparador que controla la distancia existente entre ambas. Ésta debe mantenerse constante durante el proceso de calibración. Mediante una bomba manual, se aplica una presión al gato utilizando un manómetro o lector de presión digital

para controlar convenientemente el valor de dicha presión, p_g (Kg/cm²). El gato transmite esta presión al plato superior de una célula de carga Q_c (Kg). Considerando la superficie total del gato S_g , se obtiene la siguiente relación entre p_g y Q_c :

$$p_g \cdot K_g = Q_c / S_g$$

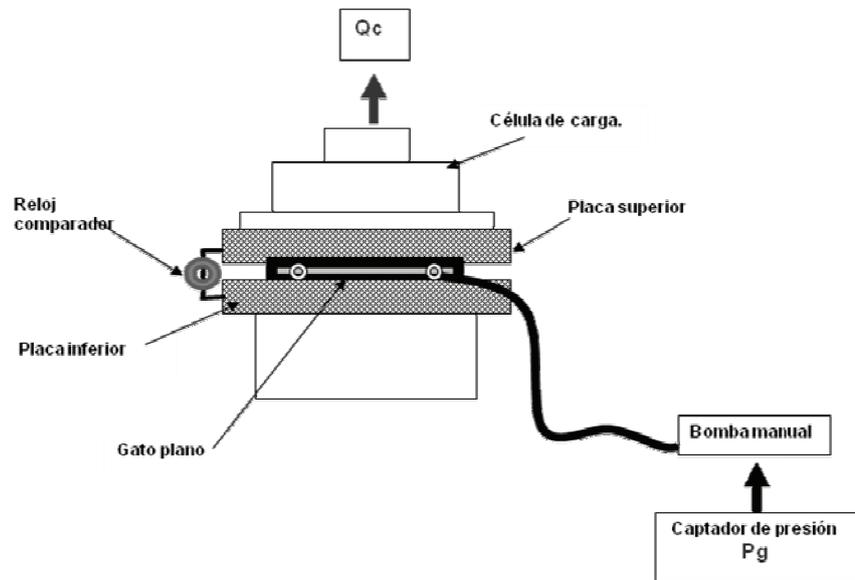


Figura 5.36

Dispositivo de calibración del Gato Plano (Sánchez-Beitia Material no publicado)

La relación entre la carga aplicada por el gato, considerando su área total y la carga registrada, será la constante del gato K_g . En condiciones ideales, de esta relación debería desprenderse que el gato transmite completamente la presión interna y que, por tanto, K_g es igual a la unidad. La influencia de la rigidez del material y de la coacción que ejercen las soldaduras, hacen que el gato no transmita esta presión completamente, obteniéndose un valor de K_g menor que la unidad.

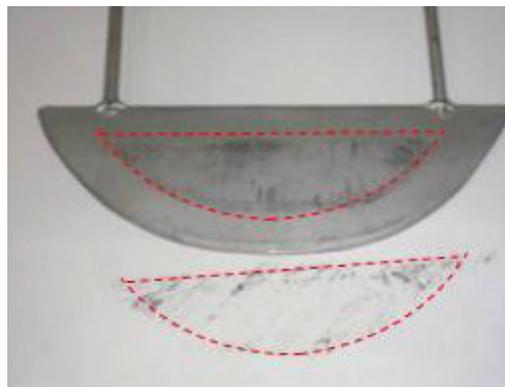


Figura 5.37

Relación entre el área efectiva y la huella en el Gato Plano (Sánchez-Beitia Material no publicado)

Los Gatos Planos, generalmente, tras varios usos requieren de una nueva calibración en previsión de posibles deformaciones ocasionadas durante los ensayos. No obstante las variaciones en los coeficientes obtenidos no son significativas, aunque en todo caso se observa que la constante del gato aumenta a medida que aumenta el número de usos.

Doble Gato Plano

Existe la posibilidad de medir la rigidez de un paramento en el caso de utilizar dos gatos planos simultáneamente (Figura 5.38). En este caso se realizan dos cortes en la superficie del muro, situándose las bases extensométricas entre los dos futuros cortes. Se realizan los dos cortes y a continuación se coloca un gato plano en cada una de las hendiduras.

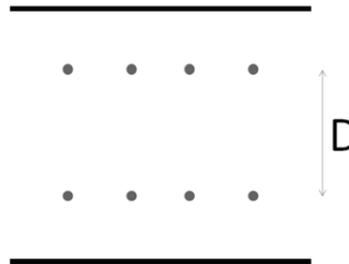
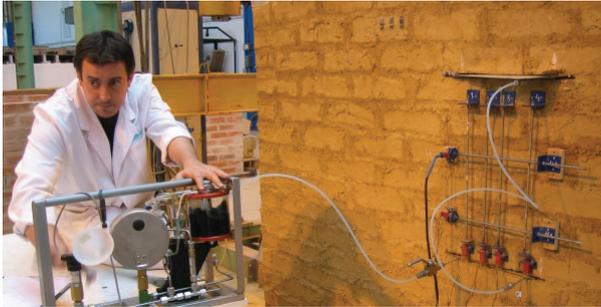


Figura 5.38

Imagen y esquema del ensayo con doble Gato Plano (Fuente: Grupo de Tecnología y Gestión de la Edificación - Universidad de Cantabria)

Los cortes suponen un aislamiento parcial en el muro, como si se tratara de un probeta, y se acomete un ciclo de carga en distintos puntos. Cada escalón de presión en los gatos corresponde a un valor en la deformación según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_i = (D - D_i) \cdot K_e$$

Siendo:

- ε_i Deformación correspondiente a un estado tensional i
- D Distancia inicial entre los puntos de referencia de las bases extensométricas
- D_i Distancia inicial entre los puntos de referencia en el estado tensional i
- K_e Constante de deformación del comparador

Una vez se ha conocido el estado tensional y la deformación correspondiente a cada paso de presión, se puede dibujar la gráfica de tensión-deformación. La pendiente de esa gráfica corresponde al módulo de elasticidad, según la Ley de Hooke.

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}$$

Como se ha especificado con anterioridad esta técnica es útil en elementos continuos y trabajando a compresión, es decir, en muros. Si se tratara de adaptar esta técnica a las estructuras de madera se complica ya que en las estructuras de madera habitualmente se trata de elementos lineales, como postes y vigas. Estos elementos constructivos lineales quedarían totalmente anulados de su función si se realizara el corte normal a la superficie que precisa la técnica de Flat Jacks y carece por completo de sentido en elementos sometidos a tracción. Se desestima la posibilidad de adaptar este método a las estructuras de madera por razones obvias.

5.2.2 Hole Drilling

La técnica conocida internacionalmente como Hole Drilling es una técnica de análisis tensional, de aquí en adelante también HD. Las características que la describen y el procedimiento de aplicación se regulan en la norma americana ASTM E837: *“Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method”*. En la Norma se establece el procedimiento para la cuantificación de tensiones residuales por conformación o fabricación de materiales isótropos, homogéneos y linealmente elásticos, aludiendo fundamentalmente a metales.

Esta técnica surgió por la necesidad de medir las tensiones internas desconocidas originadas en los procesos de fabricación o acabado de piezas y componentes metálicos, cuyo origen era térmico, mecánico o de una combinación de ambos, y que acababan dando lugar a problemas en su vida útil. Parte de estas solicitaciones, originadas en el proceso industrial, quedan remanentes en el material y se denominan Tensiones Residuales. La magnitud de estas tensiones puede ser del orden del límite elástico del material y se confinan en zonas muy cercanas a la superficie (hasta una profundidad de 1 mm en la mayor parte de los casos).

Descripción conceptual

El ensayo consiste en la liberación de esas Tensiones Residuales al eliminar por taladrado una parte del material. La extracción del material, el orificio realizado, origina una relajación de las tensiones en la zona analizada. Esa relajación es captada por medio de, al menos, tres bandas extensométricas (*Strain Gages*) convenientemente dispuestas según dicta la Norma ASTM E837. El estado tensional original en la zona analizada, es decir el anterior a la perforación, puede deducirse a partir de las deformaciones captadas mediante el adecuado esquema matemático.

La Norma se refiere exclusivamente al caso de las Tensiones Residuales derivadas de la conformación o fabricación de materiales isotrópicos, homogéneos y linealmente elásticos, y requiere una adaptación para ser aplicada en el caso de elementos sometidos a tensiones de origen estructural, sensiblemente mayores. Además de este inconveniente, la técnica también requiere de la obtención de unas constantes que relacionan las deformaciones captadas en las galgas con los estados tensionales que las originan. La metodología para la deducción de estas constantes en un material homogéneo, continuo e isótropo, como por ejemplo el acero, es muy diferente a la metodología para la deducción de dichas constantes en materiales constructivos como son la roca, el ladrillo o el mortero.

La técnica Hole Drilling en Patrimonio Arquitectónico consiste, por tanto, en adaptar experimentalmente un procedimiento normalizado para otro uso y otro ámbito. En lugar de Tensiones Residuales, se medirán Tensiones Estructurales

y en vez de materiales conformados en fábrica, el objeto del ensayo serán elementos estructurales del Patrimonio Construido.

Ciñéndose a la Norma ASTM E837, la deducción de los estados tensionales está fuertemente influenciada por las constantes A y B que relacionan las deformaciones registradas en las bandas con los estados tensionales que las originan. De acuerdo con dicha Norma, las tensiones principales y sus direcciones se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{A} - \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{B}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{A} + \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{B}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \right)$$

Siendo:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ Deformaciones registradas por las tres galgas extensométricas, formando ángulos de 0° , 90° y 225° ($\mu\text{m}/\text{m}$)

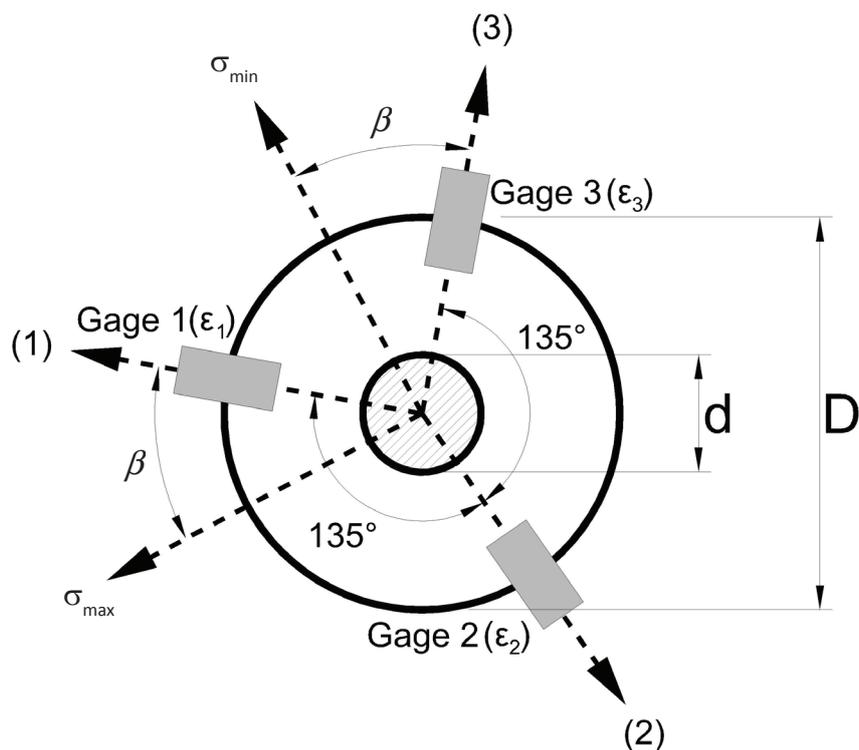
$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ Tensiones principales máxima y mínima (MPa)

β Ángulo entre σ_{\max} y ε_1 o el ángulo entre σ_{\min} y ε_3

Estas relaciones establecidas en la norma ASTM E837 se pueden resumir gráficamente según la Figura 5.39, donde las galgas Gage1 y Gage3 se disponen perpendicularmente entre sí y la galga Gage2 sobre la bisectriz, en el lado opuesto de dichas direcciones. D es el diámetro de la circunferencia que forman las tres galgas mientras que d hace referencia al diámetro de la perforación.

Figura 5.39

Disposición convencional de las bandas extensométricas y de la perforación (círculo central) de acuerdo con la Norma ASTM E837



De acuerdo con la Norma ASTM E837, las constantes A y B dependen de dos parámetros adimensionales a y b, del Módulo de Young (E) y del Coeficiente de Poisson (ν), mediante las siguientes expresiones:

$$A = -\frac{2(1+\nu)}{Ea}$$

$$B = -\frac{2}{Eb}$$

Los parámetros a y b se encuentran tabulados en la Norma. En la realización del ensayo debe tenerse en cuenta la relación entre el diámetro de la perforación (d) y el diámetro de la roseta formada por las tres bandas (D) a la hora de determinar los parámetros. Además habrá que tener en cuenta si el agujero es pasante o ciego (Tabla 5.6). La Norma recomienda que la relación entre los diámetros esté comprendida entre 0,30 y 0,50. El método resulta más preciso cuanto mayor sea la relación d/D y en general los resultados serán más precisos cuanto mayor sea la perforación. Si el elemento donde se va a realizar la perforación tiene un espesor mayor de $1,2D$, lo que ocurre habitualmente en elementos estructurales, la profundidad del agujero tiene que alcanzar 0,4 veces el diámetro de la roseta (D). Por otro lado, debe mantenerse una distancia suficiente entre el perímetro del agujero y la propia galga extensométrica con el fin de evitar daños y calentamientos excesivos durante el proceso de taladrado.

Tabla 5.6

Algunos valores numéricos de los parámetros a y b en función de la relación d/D y el tipo de perforación

| d/D | Agujero pasante | | Agujero ciego, Profundidad=0,4D | |
|------|-----------------|-------|---------------------------------|-------|
| | a | b | a | b |
| 0,30 | 0,089 | 0,278 | 0,111 | 0,288 |
| 0,35 | 0,121 | 0,364 | 0,150 | 0,376 |
| 0,40 | 0,158 | 0,454 | 0,190 | 0,466 |
| 0,45 | 0,200 | 0,544 | 0,236 | 0,558 |
| 0,50 | 0,247 | 0,629 | 0,285 | 0,648 |

En la técnica de Hole Drilling se denomina roseta a la forma compuesta por las tres galgas extensométricas necesarias para registrar las deformaciones. Habitualmente esa roseta responde a la de Tipo A en la Figura 5.40, en la que las galgas se ubican a 0°, 90° y 225°. Sin embargo, y por las necesidades de la colocación de la roseta in situ, la revisión de la norma del año 2001 añade diferentes tipos de roseta (Type B y Type C en la Figura 5.40). Igualmente, las relaciones entre los diámetros y la profundidad de la perforación se adaptan a las nuevas rosetas.

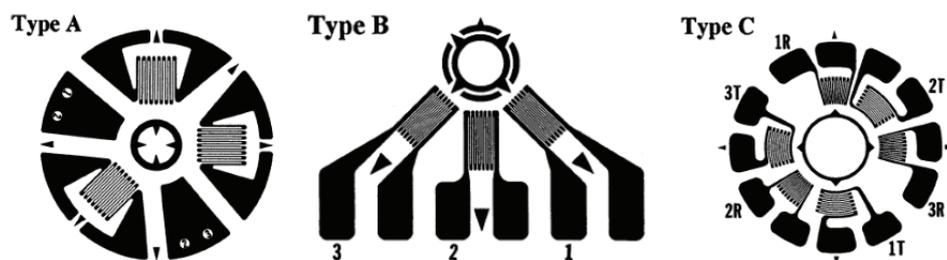


Figura 5.40
Diferentes rosetas para la medición de las deformaciones de Hole Drilling
(Fuente: ASTM E837-01)

Desarrollo de la técnica

La técnica Hole Drilling surge para dar solución a la necesidad de medir las Tensiones Residuales en cualquier elemento, pieza o componente metálico que en su proceso de fabricación genera esfuerzos que persisten a lo largo de su vida útil. Este es el origen y el detonante de las bases conceptuales que rigen la técnica (Schajer 2010a). Las primeras referencias a las Tensiones Residuales se remontan a los años 30 del siglo XX (Drahokoupil 1930, von Laue 1931, Reissner 1931, Meier 1937) y al mismo tiempo empezó el desarrollo de la técnica HD (Mathar 1934).

Los objetivos iniciales de la técnica HD fueron fundamentalmente dos: medir las Tensiones Residuales en materiales metálicos industrializados y el control de soldaduras de elementos en servicio, como depósitos de agua soportando grandes presiones, cascos de barcos o vías ferroviarias.

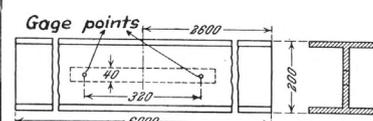
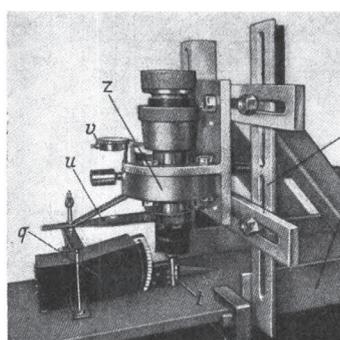


Figura 5.41
Aparato presentado por J. Mathar para medir tensiones de fabricación en perfiles H (Mathar 1934)

La técnica Hole Drilling sigue de plena actualidad, mejorado constantemente y surgiendo nuevas aplicaciones en elementos metálicos (Baldi 2014b, Barile, Casavola et al. 2014, Bloedorn, Viotti et al. 2015, Janikowski, Blessman 2008, Huang, Liu et al. 2013, Bouchard, George et al. 2005). Además, la técnica ha evolucionado en varios aspectos fundamentales, refiriéndose a los métodos de medición de las deformaciones, a las herramientas de perforación y abarcando otros materiales no-metálicos sobre los que realizar el ensayo.

Medición de las deformaciones

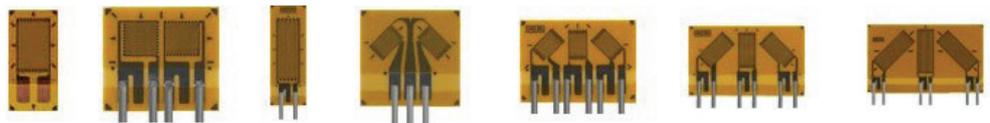
Josef Mathar, pionero en la aplicación de la técnica Hole Drilling, diseñó en los años 30 un dispositivo utilizando un taladro de baja velocidad y un extensómetro mecánico para medir las deformaciones tras la relajación del material metálico (Figura 5.41).

Más adelante, ya en los años 50, otros autores continuaron desarrollando investigaciones en torno a esta técnica. Cabe destacar los avances tecnológicos alcanzados en cuanto al proceso de medida de las deformaciones. Se introduce por primera vez el uso de galgas extensométricas (Strain Gages) para medir las deformaciones por relajación alrededor de la perforación sustituyendo al inicial extensómetro mecánico (Rendler, Vigness 1966, Soete, Vancrombrugge 1950).

Las galgas extensométricas son unos sensores capaces de transformar una tensión en un cambio de la resistencia eléctrica y de hacer una lectura directa de las deformaciones longitudinales con alta precisión (Figura 5.42). El proceso experimental consiste en adherir la galga, una lámina metálica sobre una base o rejilla flexible y aislante, en la superficie del elemento objeto de estudio.

Figura 5.42

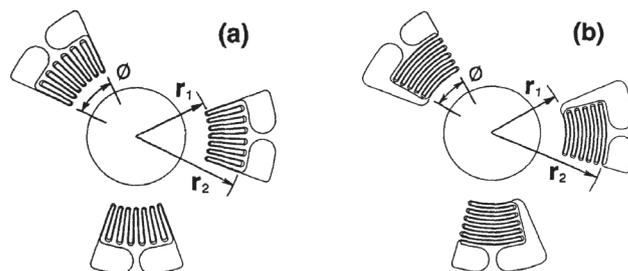
Distintas galgas extensométricas sobre base flexible y aislante
(Fuente: HBM)



El desarrollo de las bandas extensométricas ha cubierto la necesidad de medir las deformaciones durante años, utilizándose habitualmente en los ensayos de Hole Drilling. Las continuas investigaciones y los avances tecnológicos han permitido que se hayan realizado numerosas innovaciones tanto en las geometrías como en la dirección del serpentín de deformación (Giri, Pandey et al. 2015, Huang, Liu et al. 2013, Schajer, Tootoonian 1997).

Figura 5.43

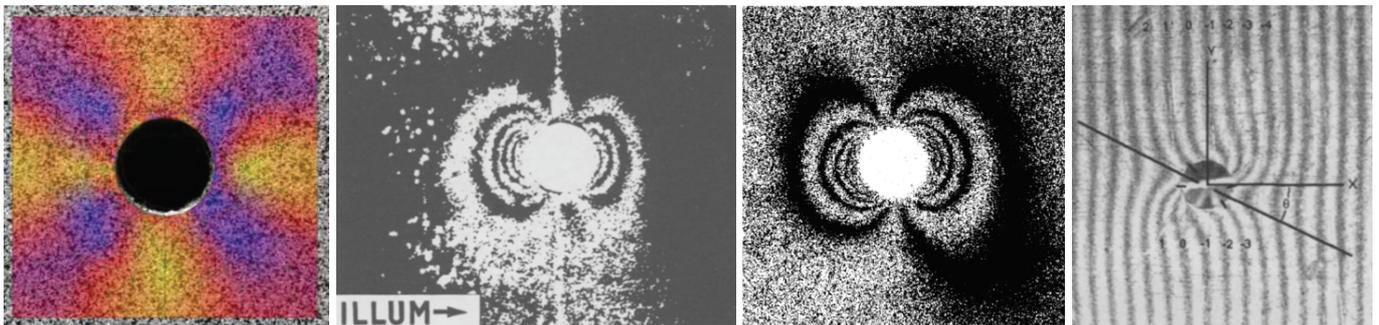
Rosetas para Hole Drilling con distintas direcciones del serpentín, radial y circunferencial, respectivamente
(Schajer, Tootoonian 1997)



Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado paralelamente nuevas técnicas ópticas para medir las deformaciones, entre las que destacan las técnicas de Correlación Digital de Imágenes (Baldi 2014a, Baldi 2014b), el láser óptico (Martinez-Garcia, Wenzelburger et al. 2014). y la Interferometría, sea electrónica, holográfica o Moiré (Barile, Casavola et al. 2014, Cárdenas-García, Ekwaro-Osire et al. 2005, Diaz, Kaufmann et al. 2000, Laakkonen, Rickert et al. 2014, Nelson, Mccrickerd 1986, Ponomarev, Popov et al. 1994, Qin Le, Xie HuiMin et al. 2014, Schajer, Steinzig 2005, Viotti, Albertazzi 2013, Pisarev, Eleonsky et al. 2015, Wu, Lu et al. 1998, Zhu Wu, Jian Lu et al. 1998, Schwarz, Kutt et al. 2000, Min, Hong et al. 2006, Jian Lu, Zhu Wu et al. 1998).

Figura 5.44

Ejemplos de medidas de deformación alrededor del agujero mediante distintas técnicas ópticas: DIC(Baldi 2014b), Interferometría holográfica (Nelson, Mccrickerd 1986), digital (Pisarev, Eleonsky et al. 2015) y Moiré (Schwarz, Kutt et al. 2000), respectivamente



Herramientas de perforación

Josef Mathar, en el primer dispositivo, realizaba la perforación mediante un taladro manual de baja velocidad (Figura 5.41). Al igual que en la medición de las deformaciones, los avances de la tecnología han permitido la creación de taladros cada vez más sofisticados (Figura 5.45), evolucionando desde la mejora del taladro manual de Rendler y Vigness (Rendler, Vigness 1966) hasta llegar a los taladros de alta precisión de hoy en día (Bloedorn, Viotti et al. 2015, Nau, Scholtes 2013). En general, se trata de taladros de alta velocidad que disponen de unos soportes de fijación para anclarse perfectamente sobre la superficie del material analizado y que permiten que el orificio sea totalmente perpendicular a la superficie. Son dispositivos capaces de realizar el taladro del diámetro y la profundidad deseada con una precisión muy alta, mediante distintos cabezales (Figura 5.46) y sistemas de taladrado en función de su movimiento (fijo u orbital), a veces utilizados en el mundo de la odontología. Para las aplicaciones más habituales de la técnica, en elementos isotrópicos y linealmente elásticos, donde tanto las rosetas como la perforación son cada vez reducidas (apenas unos milímetros) existen distintos taladros de alta velocidad, fresas y turbinas de aire, con distintos cabezales o brocas.

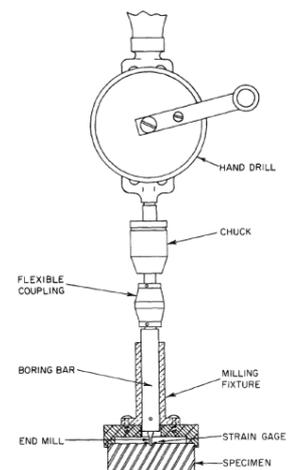


Figura 5.45

Arriba, dispositivo manual mejorado por Rendler y Vigness (Rendler, Vigness 1966) y a abajo, imagen de un taladro de alta precisión para la correcta ejecución del orificio (www.vishaypg.com)

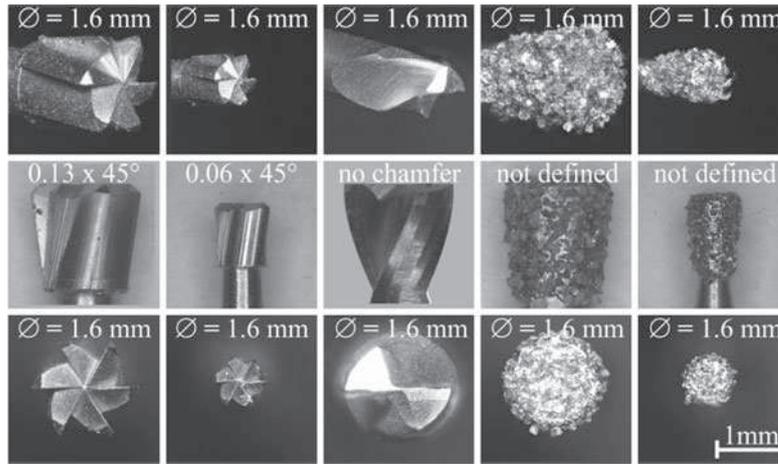
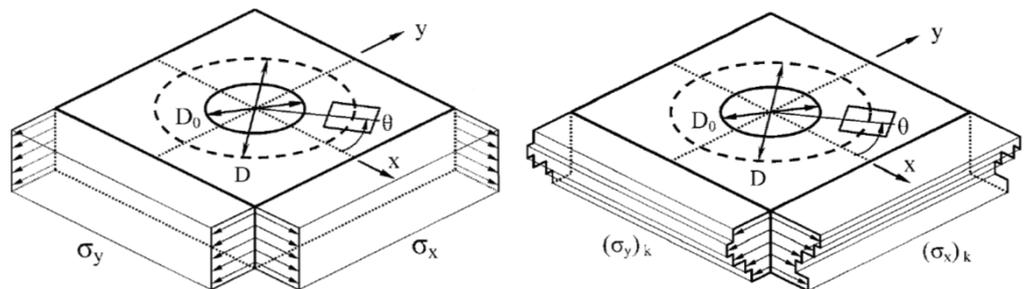


Figura 5.46
Distintos cabezales de aplicación en los taladros de alta velocidad (Nau, Scholtes 2013)

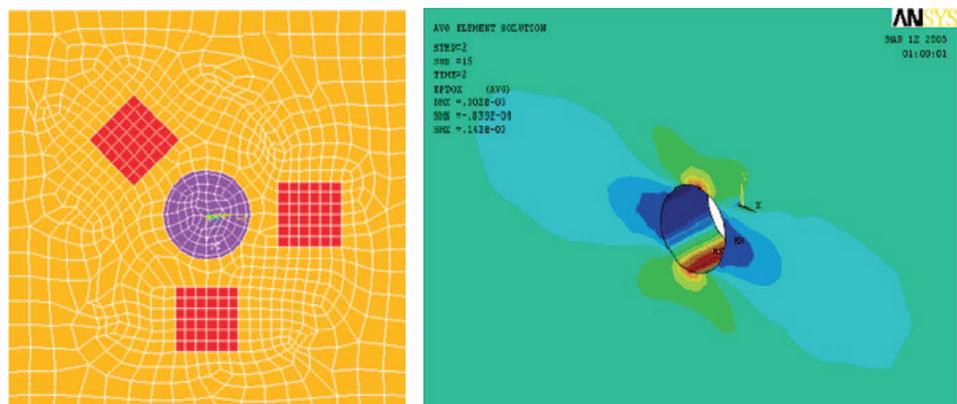
La profundidad de la perforación también infiere en la relajación de las tensiones en la superficie del material. Al principio se consideraba que las tensiones eran uniformes, pero a partir de 2008 la Norma ASTM E837-08, considera también las tensiones no-uniformes (Figura 5.47), variando en función de la profundidad alcanzada en la perforación e introduciendo una nueva constante a tener en cuenta en el cálculo de las tensiones mediante la técnica de Hole Drilling. Sin embargo, siguen considerándose exclusivamente materiales isotrópicos y linealmente elásticos.

Figura 5.47
Esquemas de las tensiones residuales en función de la profundidad. A la derecha tensiones uniformes, y a la izquierda tensiones no-uniformes (Fuente: ASTM E837-08)



Hoy en día existe la opción de simular mediante programas de elementos finitos la extracción de material que supone el Hole Drilling.

Figura 5.48
Simulación mediante elementos finitos de la superficie, la roseta y el agujero de Hole Drilling en un material isotrópico y en un anisótropo, respectivamente (Shokrieh 2007)



Aplicaciones en otros materiales

Otras aportaciones fundamentales en el desarrollo de la técnica fueron propuestas en los años 70 por Bert et al. (Bert, Thompson 1968, Lake, Appl et al. 1970) y por Prasad et al. (Prasad, Prabhakaran et al. 1987a, Prasad, Prabhakaran et al. 1987b), aludiendo no solo a materiales isotrópicos, homogéneos y linealmente elásticos, sino a los materiales rectangularmente ortotrópicos. Se denominan así a los materiales que disponen dos ejes perpendiculares u ortogonales de simetría elástica. Son muchos los autores que han continuado con la adaptación de la técnica en materiales ortotrópicos, dando lugar a numerosos avances, adaptación a distintos materiales y a publicaciones (Pagliaro, Zuccarello 2007, Pisarev, Eleonsky et al. 2015, Prasad, Prabhakaran et al. 1987a, Prasad, Prabhakaran et al. 1987b, Safarabadi 2015, Schweizer, Dickele et al. 2014, Shokrieh 2007, Shokrieh, Kamali 2005, Turnbull, Maxwell et al. 1999, von Mirbach 2014).

Este concepto es fundamental para la aplicación de esta técnica en elementos de madera. En realidad, la necesidad de extender la técnica a otros materiales, no solo a los isotrópicos y linealmente elásticos, surge con la aparición de nuevos materiales tecnológicos, los composites reforzados con fibras, plásticos e incluso en cerámicas en el ámbito de la odontología (Mainjot, Schajer et al. 2011). Se ha mencionado reiteradamente que la madera, siendo un material natural cuya estructura interna es fibrosa, puede asemejarse elásticamente a estos nuevos materiales.

Fueron Schajer y Yang quienes fundamentaron matemáticamente la aplicación de la técnica Hole Drilling en materiales reforzados con fibras (Schajer, Yang 1994). Las referencias a los avances de técnica y en estos materiales conducen constantemente a Gary S. Schajer, profesor e investigador en la *University of British Columbia* en Vancouver, Canadá. Sus investigaciones en torno a las tensiones residuales en los materiales han sido muy profusas, repercutiendo enormemente en este campo, desde sus primeras publicaciones sobre Hole Drilling a principios de los años 80 (Schajer 1981) hasta la actualidad. Este autor ha colaborado activamente en las sucesivas revisiones de la Norma ASTM E837 y es miembro del comité E28-13 de ASTM sobre mediciones de tensiones residuales. Sus investigaciones han dado como fruto numerosos artículos científicos (Schajer 1988b, Schajer 1988a, Schajer, Yang 1994, Schajer, Altus 1996, Schajer, Steinzig 2005, Schajer 2010a, Schajer 2010b), capítulos de libros e incluso libro completo, publicado en 2013, bajo el título de *Practical Residual Stress Measurement Methods* (Schajer 2013).

Hasta el momento todas las referencias aportadas aluden a las Tensiones Residuales, generadas en la conformación de los materiales. Sin embargo, en esta Tesis Doctoral las tensiones a medir mediante la técnica Hole Drilling serán de origen estructural, es decir derivadas de la acción de las cargas constructivas y demás acciones en la edificación sobre los elementos estructurales.

Algunos profesores de la Escuela de Arquitectura de Donostia-San Sebastián propusieron por primera vez la posibilidad de aplicar esta técnica, hasta entonces únicamente conocida con sus aplicaciones en materiales tecnológicos de altísima precisión, a las estructuras históricas de mampostería. Desde la primera concepción de esta posibilidad han pasado algunos años, considerándose su aplicación y adaptación tanto en elementos de piedra (Sánchez-Beitia, Schueremans 2009, Sánchez-Beitia 2007b, Sánchez-Beitia 2008, Sánchez-Beitia, Schueremans et al. 2009) como en fábrica de ladrillo (Sánchez-Beitia 2007a). En este contexto, el director de esta Tesis Doctoral, Dr. Santiago Sánchez-Beitia, tiene una fructífera trayectoria, pudiéndose referenciar varios ejemplos de aplicación reciente de la técnica en edificios muy reconocidos en el mundo de la arquitectura como en la Catedral de Santa María del Mar (Sánchez-Beitia, Roca 2014) o la Catedral de Palma de Mallorca (Sánchez-Beitia 2015), entre otros (Sánchez-Beitia 2008, Sánchez-Beitia 2007b, Sánchez-Beitia, Schueremans et al. 2009).

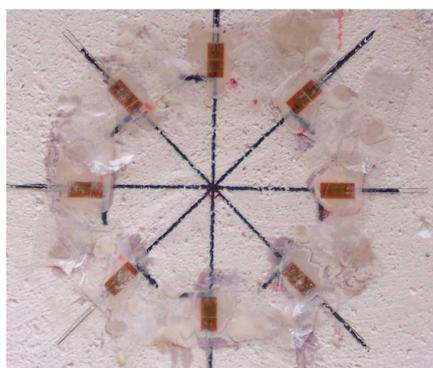
Realización del ensayo

El procedimiento de medida de las tensiones estructurales en elementos de piedra o fábrica de ladrillo sometidos a compresión es laborioso y se compone de varios pasos que tienen todos ellos una fuerte incidencia en los resultados, según las observaciones de Sánchez-Beitia (Sánchez-Beitia Material no publicado). Esta nueva aplicación de la técnica requiere adaptar varios aspectos en relación a las aplicaciones conocidas hasta el momento en el mundo de la ingeniería, y a nivel comercial existen algunas limitaciones debido a que no es una práctica generalizada. Mientras que para medir Tensiones Residuales en piezas metálicas existen distintas rosetas y taladros de última generación, en la nueva escala juega un papel decisivo la mano de obra del investigador y su buen hacer para formar la roseta, requiriendo dibujar la roseta previamente en su posición y adhiriendo las galgas extensométricas una a una en su posición.

Por otro lado Sánchez-Beitia, optó por emplear ocho bandas extensométricas (Figura 5.49, izquierda) en lugar de tres para el análisis de fábricas de sillería formando una situación redundante, con el objeto de eliminar o modular posibles errores experimentales (Sánchez-Beitia, Schueremans 2009).

Figura 5.49

Comparación entre una roseta realizada in situ mediante ocho galgas extensométricas sobre piedra (izquierda) y una roseta comercial sobre la parte curva tubo de acero de 20mm de diámetro tras realizar el ensayo de Hole Drilling (derecha) (Janikowski, Blessman 2008)



Para la aplicación de la técnica HD en los elementos estructurales, se aumenta de escala en todos los aspectos, sobre todo en lo que se refiere a la dimensión de las galgas, y en consecuencias de la roseta y del propio agujero (diámetro y profundidad). En el caso de medir las tensiones en un pilar de piedra, las galgas extensométricas se colocan sobre una circunferencia de 80 mm de diámetro. La perforación aumenta de escala y se realiza mediante una corona de diamante acoplada a un taladro convencional. Se elimina un cilindro de 36 mm de diámetro y 32 mm de profundidad. El empleo de una escala mayor se debe a que todo el procedimiento experimental está sujeto al factor de la realización “a mano” sin rosetas standard.

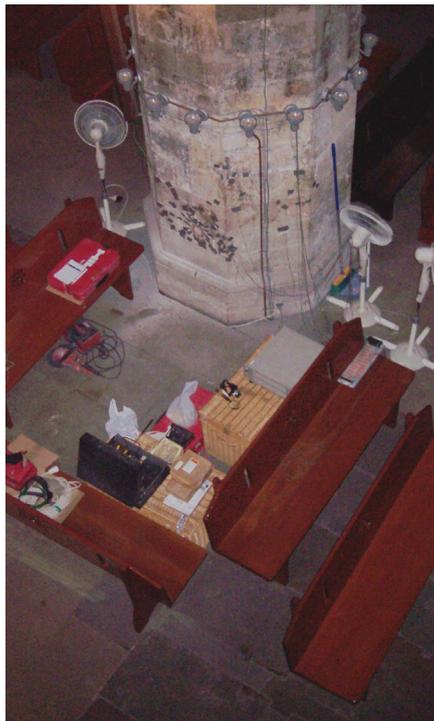
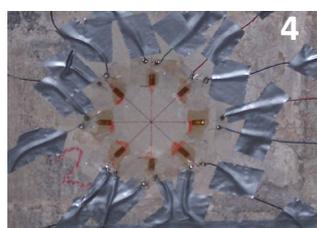


Figura 5.50

Vista general de uno de los pilares analizados en Santa María del Mar en Barcelona (Sánchez-Beitia Material no publicado)

La fotografía de la Figura 5.50 muestra una vista general del despliegue de medios para la realización de un ensayo Hole Drilling en unos de los pilares de la Catedral de Santa María del Mar en Barcelona, cuyos resultados han sido publicados recientemente a nivel internacional (Sánchez-Beitia, Roca 2014). En la Figura 5.51 pueden verse los pasos a seguir en el proceso de medición de las deformaciones mediante la técnica Hole Drilling en piedra.



1) Limpieza de la superficie

Lijar y retirar el polvo

(2) Marcado de referencias

Dibujar la roseta para la posterior adhesión de las galgas

(3) Pegado de las galgas

Colocar las 8 galgas en sus correspondientes posiciones

(4) Conexiones eléctricas

Conectar eléctricamente las galgas al aparato de medición

(5) Taladrado

Realizar la perforación mediante una corona de diamante

Figura 5.51

Proceso de realización de Hole Drilling en uno de los pilares de Santa María del Mar en Barcelona (Sánchez-Beitia Material no publicado)

En los casos analizados por Sánchez-Beitia se ha considerado la piedra como un material isótropo y continuo, y ha podido aplicarse el método matemático recomendado en la Norma ASTM E837 sin apenas modificaciones. Las relaciones y proporciones entre la roseta, las bandas extensométricas y el agujero se han mantenido, pero en una escala mayor.

Finalmente, el profesor Sánchez-Beitia también lanza la hipótesis de aplicar la técnica en estructuras de madera (Sánchez-Beitia, Torres et al. 2012). Esta idea aúna las dos vertientes analizadas hasta el momento: por un lado la aplicación del Hole Drilling sobre materiales con comportamiento ortotrópico, refiriéndose a *composites* reforzados en un ámbito más bien tecnológico, y por otro lado la necesidad de medir de las tensiones de origen estructural en elementos de madera del Patrimonio Histórico. Esta idea debe definirse en profundidad y es precisamente en este punto donde esta Tesis Doctoral recoge el relevo de la evolución de la técnica de Hole Drilling.

Capítulo 6

METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE LA TÉCNICA HOLE DRILLING EN ESTRUCTURAS DE MADERA

6.1 Introducción

La técnica Hole Drilling puede dar solución al desconocimiento que muchas veces existe alrededor de la capacidad portante o resistente de un elemento estructural histórico. La inspección in situ de las estructuras de madera en el contexto de la conservación del Patrimonio se torna fundamental, y aunque existen numerosas técnicas para determinar las propiedades y el estado de conservación de las mismas, no existe por el momento una técnica propiamente de análisis estructural que pueda aplicarse en el propio edificio. La técnica Hole Drilling puede aportar ese dato fundamental en dicha inspección: el estado tensional real y actualizado de los elementos estructurales de madera.

Aunque se trata de una técnica ya conocida por sus aplicaciones en otros materiales, la novedad que aporta esta Tesis Doctoral radica en que por primera vez se aplica Hole Drilling en las estructuras existentes de madera. Para ello ha sido necesaria una labor de adaptación a la condición de ortotropía intrínseca de la madera por un lado y, por otro lado, a las tensiones de origen estructural.

Antes de continuar con el trabajo experimental, en que se han llevado a cabo ensayos a compresión y a flexión con el fin de abarcar los distintos comportamientos estructurales, conviene detenerse en la adaptación metodológica a estas condiciones.

6.2 Adaptación a la condición de ortotropía

La condición de ortotropía se da en aquellos materiales anisótropos en el que las direcciones principales elásticas son perpendiculares entre sí. La madera, distinguiéndose en ella tres direcciones elásticas, es probablemente el material ortótropo más conocido y más abundante sobre la tierra (Dinçkal 2011). Su composición a base de fibras paralelas al eje del tronco, marca una clara direccionalidad axial o longitudinal, siendo las prestaciones físicas y mecánicas mayores en esta dirección que en las otras dos. Las direcciones radial y tangencial son perpendiculares a la dirección axial y también lo son

entre sí, formando un plano transversal al eje de crecimiento del árbol.

El método convencional de Hole Drilling, basado en la Norma ASTM E837, es solamente válido para cuantificar Tensiones Residuales en materiales isotrópicos, continuos y homogéneos y su aplicación ha sido perfeccionada durante años dando lugar a muy buenos resultados. Sin embargo, muchos materiales no se comportan igual, ni tienen las mismas propiedades físico-mecánicas según la dirección en que se estudien. Para resolver este problema en los materiales anisótropos varios investigadores han realizado adaptaciones y aproximaciones, como se vio en un capítulo anterior. A finales del siglo XX S.G. Schajer y L. Yang (Schajer, Yang 1994) lanzaron finalmente un esquema matemático, adaptando el caso isotrópico al ortotrópico con una formulación exacta (Ecuación 1), siempre para la medición de un estado tensional plano en la superficie de los materiales.

Ecuación 1

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \sigma_x \end{pmatrix} = \sqrt{E_x E_y} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{pmatrix}$$

1. Matriz de *compliance*

2. Estado tensional plano

3. Módulos de elasticidad principales en la superficie

4. Deformaciones de Hole Drilling alrededor de la perforación

En la presente Tesis Doctoral se toma como base matemática este esquema propuesto por Schajer y Yang, aunque los avances para adaptar la técnica a los nuevos materiales tecnológicos no se detienen aquí.

En 2007 los autores P. Pagliaro y B. Zuccarello aportaron más conocimiento y profundidad en el análisis de las Tensiones Residuales en los nuevos materiales ortótropos, ampliando el conocimiento a composites de diversas características (*unidirectional, cross-ply and angle-ply laminates*) (Pagliaro, Zuccarello 2007). Estos autores implementaron la fórmula del estado tensional plano a través de simulaciones numéricas en 3D y suponiendo tensiones no uniformes. Pagliaro y Zuccarello presentan la técnica de Hole Drilling como una relajación elástica que se produce en los materiales tras la perforación, denominando deformaciones por relajación del material ($\epsilon^{(r)}$) a las que se producen tras hacer un agujero. Los autores representan esa deformación $\epsilon^{(r)}$ como la diferencia entre las deformaciones después del taladro $\epsilon^{(ad)}$ (*after*

drilling) y las deformaciones existentes en la superficie antes de la realización del taladro $\epsilon^{(bd)}$, (before drilling), (Figura 6.1).

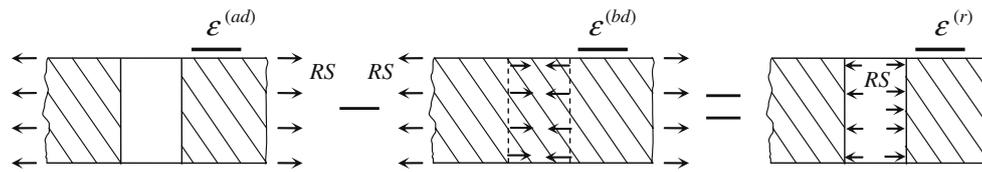


Figura 6.1

Principio de superposición para la evaluación de las deformaciones por relajación del material después de la operación de Hole Drilling (Pagliaro, Zuccarello 2007)

Para la aplicación en elementos estructurales de madera aserrada sin tratar, se toma como base el esquema matemático lanzado por S.G. Schajer y L. Yang para el cálculo de las tensiones en la superficie de los materiales ortotrópicos (Schajer, Yang 1994). Antes de continuar, es preciso definir los conceptos que se enumeran en la Ecuación 1, a los que se hará referencia constantemente de aquí en adelante para establecer las relaciones de Hole Drilling también en madera:

1. Matriz de compliance

Se denomina matriz de compliance a la matriz que define elásticamente al material estudiado en el proceso de Hole Drilling. Se trata de una matriz de tres filas por tres columnas asociada a las propiedades elásticas del material según las principales direcciones y a las deformaciones por relajación. Cada material elástico tiene un modo de relajarse tras eliminar parte del material. Se utilizará el término internacional anglosajón, ya que resulta complicado definir con una única palabra en español este concepto de “matriz que define un comportamiento elástico”.

2. Estado tensional plano

A diferencia de las Tensiones Residuales introducidas en la generación de algunos materiales, el estado tensional de un elemento estructural está directamente relacionado con las cargas y demás acciones que soporta. El estado de tensiones depende, además, de la geometría del propio elemento y de la función que cumpla en el conjunto de una estructura. Se refiere a un estado de tensiones plano existente en la superficie del material. El plano de la superficie está formado por las direcciones X-Y.

3. Módulos de elasticidad principales superficiales

Los módulos de elasticidad son parámetros que caracterizan el comportamiento de los materiales elásticos, relacionando la tensión con la deformación según la Ley de Hooke. En función de cómo y cuánto se deforma un elemento sometido a una fuerza el módulo elástico tiene un valor u otro. En madera difiere mucho según la dirección en que se mida a causa de la anisotropía. En el caso que acomete esta Tesis Doctoral, se denominan módulos de elasticidad principales en la dirección de las fibras y su perpendicular en la superficie del material, donde se coloca la roseta.

4. Deformaciones por relajación en el perímetro del agujero

Son las deformaciones que caracterizan a esta técnica. Hole Drilling es una técnica de relajación de las tensiones tras realizar una perforación en el material. Son tres deformaciones registradas por las galgas extensométricas tras la operación Hole Drilling.

La mayoría de las referencias de aplicación de Hole Drilling en condiciones de ortotropía aluden a materiales artificiales reforzados con fibras, a los que se les asigna una dirección principal de forma artificial. En los elementos de madera, análogamente pero de manera natural, existe una dirección fuerte o principal en la dirección del eje de crecimiento del árbol.

Resulta de vital importancia, antes de continuar con el desarrollo de la teoría, distinguir las direcciones asignando un sistema plano de referencia geométrica para la colocación correcta de la roseta. En la Figura 6.2 se representa la superficie de un elemento de madera: el eje Y del sistema de referencia coincide con la dirección de las fibras de la madera, en la que se va a colocar la banda extensométrica (Gage 1) que medirá la deformación ϵ_1 , y el eje X es el perpendicular a las fibras de la madera, donde se ubicará la banda extensométrica (Gage 3) encargada de medir la deformación ϵ_3 . Las propiedades elásticas en la dirección de las fibras se identificarán con el subíndice $_y$ y las de la dirección perpendicular a las fibras con el subíndice $_x$. Debe decirse que muchas veces la dirección X, perpendicular a las fibras, se corresponde con una dirección tangencial al ser medidas en la superficie del material y no en el interior. Los cortes de carpintería para escuadrar los rollizos de madera, habitualmente son tangenciales a los anillos de crecimiento, más aun en grandes escuadrías.

Finalmente, en el eje bisector y formando un ángulo de 225° con el eje X (0°) se ubica la banda ϵ_2 , completando la roseta según lo establecido en la Norma ASTM E837.

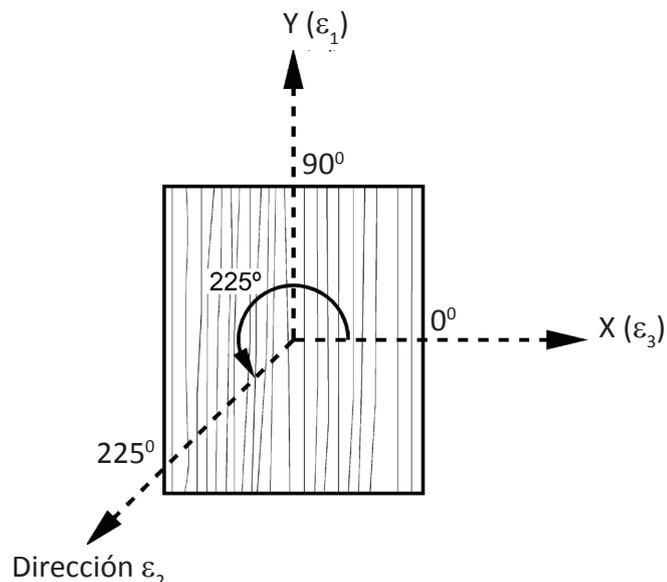


Figura 6.2
Sistema de referencia X-Y
establecido en relación con la
roseta de deformación

Desarrollando el esquema matricial de la Ecuación 1, se obtienen las siguientes ecuaciones lineales que habrá que resolver durante el proceso experimental:

$$c_{11} \sigma_y + c_{12} \tau_{xy} + c_{13} \sigma_x = \sqrt{E_x E_y} \varepsilon_1 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$c_{21} \sigma_y + c_{22} \tau_{xy} + c_{23} \sigma_x = \sqrt{E_x E_y} \varepsilon_2 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$c_{31} \sigma_y + c_{32} \tau_{xy} + c_{33} \sigma_x = \sqrt{E_x E_y} \varepsilon_3 \quad \text{Ecuación 4}$$

Según los autores S.G. Schajer y L. Yang, para el caso de ortotropía concreto en el que las direcciones X-Y de la roseta coinciden con las principales direcciones elásticas del material, las constantes de compliance c_{12} y c_{32} serán iguales a cero (Schajer, Yang 1994). Es el caso de interés en este trabajo, por eso se debe tener en cuenta el sistema de referencia en el desarrollo de las Ecuaciones 2, 3 y 4. El resto de las constantes dependerán de las propiedades ortotrópicas del material.

6.3 Adaptación a las tensiones estructurales

El objetivo final de esta Tesis es medir las tensiones existentes en elementos estructurales de madera como consecuencia de soportar cargas arquitectónicas y demás acciones externas. Las aplicaciones habituales de la técnica Hole Drilling sirven como soporte para la investigación que se desarrolla a continuación, aunque serán necesarias algunas adaptaciones, como se ha visto, al material madera y también a la escala.

Aunque la Norma ASTM E837, a la que se alude constantemente, no es de aplicación directa en el caso de las estructuras de madera, se siguen sus recomendaciones en cuanto a las relaciones que deben guardar entre sí las galgas extensométricas en la composición de la roseta y con respecto a la perforación que desencadena la relajación de las tensiones (Tabla 6.1).

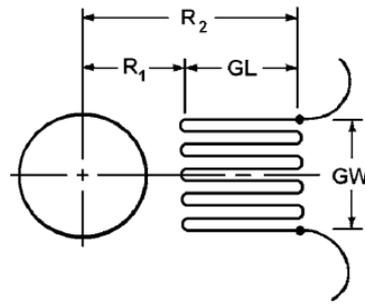
Tabla 6.1

Proporción y dimensiones elegidas entre los elementos de Hole Drilling aproximándose a las indicaciones de la Norma ASTM E837

| | D | Depth | GL | GW | R ₁ | R ₂ | d min | d máx |
|-----------------------------|-------|-------|--------|--------|----------------|----------------|----------------------|--------------------|
| ASTM E837 | D | 0.4D | 0.309D | 0.309D | 0.3455D | 0.6545D | 0.6MaxD _o | Max D _o |
| Dimensiones Elegidas | 40 mm | 16 mm | 10 mm | 10 mm | 15 mm | 25 mm | 10.80 mm | 18 mm |

Siendo:

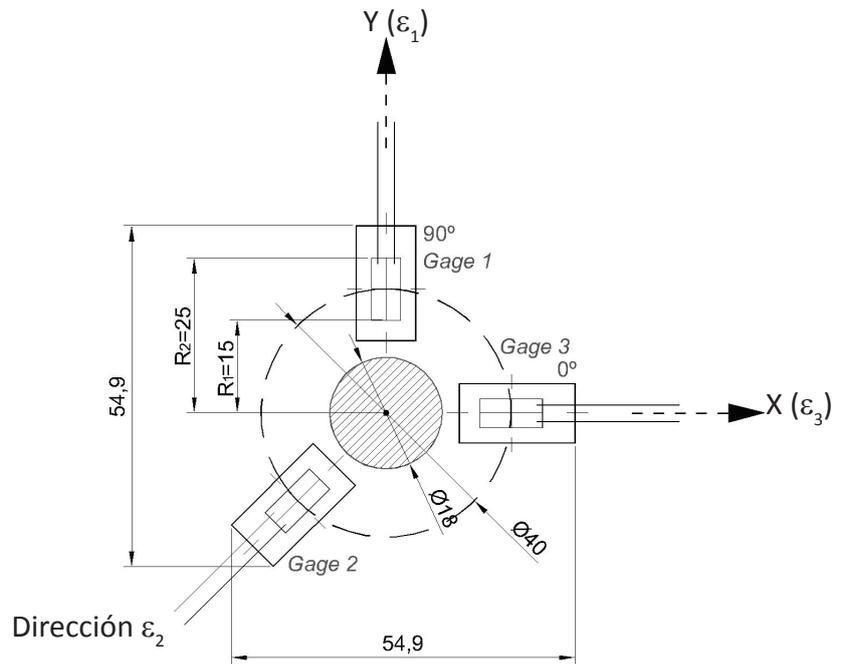
Figura 6.3
Detalle galga según la Norma
ASTM E837



- D** Diámetro Roseta
- Depth** Profundidad agujero
- GL** Longitud galga
- GW** Ancho galga
- R₁** Distancia del centro al inicio de la galga
- R₂** Distancia del centro al final de la galga
- d** Diámetro del agujero

Sin embargo, las dimensiones que se adoptan para la realización de los ensayos están fuertemente condicionadas y limitadas por los equipos y dispositivos disponibles comercialmente. Mientras que para la realización de la operación de Hole Drilling en las reducidas dimensiones sobre componentes metálicos existen rosetas comerciales, para escalas más amplias no existen por el momento, y deben disponerse manualmente tres bandas extensométricas individuales para formar la roseta en la escala deseada (Figura 6.4).

Figura 6.4
Disposición relativa de las
galgas extensométricas con
relación al agujero de taladro
(medidas en milímetros)



La elección del tamaño de la roseta ha sido principalmente intuitiva (40 mm de diámetro) pero también relativa al tamaño de las galgas extensométricas disponibles en el mercado (10 mm de longitud). El proceso experimental se realizará a mano, y tratando de evitar errores que serían ineludibles en una escala más pequeña, la perforación debe ser mayor. Por otro lado, la incidencia que supone la realización del agujero mecánicamente debe ser menor de la que puede suponer un nudo, se opta por una perforación de Ø18 mm. Por otro lado,

la profundidad del agujero debe ser suficiente para relajar completamente las tensiones internas (16 mm). Tras la perforación es aconsejable tapar el agujero que reste de la operación para evitar humedad y la penetración de insectos y de paso, preservar la apariencia del elemento.

6.4 Medios instrumentales y materiales

Los medios materiales e instrumentales no se encuentran desarrollados específicamente para la aplicación que aquí se propone y deben ser diseñados en el desarrollo de esta Tesis para poder llevar a cabo los ensayos propuestos.

Las probetas

Para los ensayos que se muestran a lo largo del presente trabajo de investigación, la especie arbórea elegida y objeto de estudio de esta Tesis Doctoral, es el *pinus radiata* D. Don originario del norte de la península. Una vez se haya comprobado la validez de la técnica Hole Drilling en una determinada especie, se podrán caracterizar otras especies, como el roble o el castaño, siguiendo el mismo esquema.

Las probetas utilizadas en la campaña experimental que concierne a esta Tesis Doctoral serán de madera aserrada y sin tratar (Figura 6.5), tratando de emular las condiciones en la mayoría de las construcciones históricas. La madera será cortada en piezas grandes o de gruesa escuadría (MEG, Madera Estructural Gruesa, según la normativa actual). En las piezas de tamaño estructural resultan inevitables las alteraciones de crecimiento del árbol, a menudo llamadas “defectos” no sin controversia. Estas singularidades afectan a la capacidad resistente y al comportamiento de la madera en general, pero por definición del propio material y no por un “defecto de fabricación”.

Figura 6.5

Vista de las vigas estructurales de las que se extrajeron las probetas



Galgas extensométricas

Las bandas elegidas (*SG, Strain Gage*) para los ensayos son de la serie Y de HBM®. La longitud máxima disponible en este tipo de galgas es de 10 mm (Figura 6.6). Se trata de galgas extensométricas unitarias, no rosetas, y longitudinales cuyo rango de utilización está determinado según un código que define sus características y su geometría (Figura 6.7). Las galgas están compuestas por una rejilla de medición, un serpentín metálico aleación de cobre y níquel, sobre un soporte de poliamida y dos antenas de acero.



Figura 6.6

Fotos en detalle de las bandas 1-LY11-10/120 utilizadas en la investigación junto al adhesivo recomendado

Series Y

with 1 measuring grid / linear SG

LY11

Linear SG

Temperature response matched to steel
with $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6}/K$ ($6,0 \cdot 10^{-6}/F$)

LY13

Temperature response matched to aluminum
with $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}/K$ ($12,8 \cdot 10^{-6}/F$)

LY1x

Temperature response matched to customer's choice
see page 16

Illustrations show actual size
(Data: grid length in mm/inch)

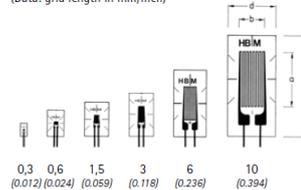


Figura 6.7

Dimensiones de las bandas extensométricas, habiendo elegido la 1-LY11-10/120 (Fuente: Catalogo HBM)

Contents per package: 10 pcs.

| Types available ex stock | | Variants | Nominal resistance | Dimensions (mm/inch) | | | | Max. perm. effective bridge ex. voltage | Solder terminals |
|--------------------------|----------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|----------------|---------------|------------------------|---|------------------|
| Steel | Aluminum | | | Other | Measuring grid | | Measuring grid carrier | | |
| | | | Ω | a | b | c | d | V | |
| 1-LY11-0.3/120 | | 1-LY1x-0.3/120 ^(*) | 120 | 0.3 0.012 | 0.9 0.035 | 2 0.079 | 1.2 0.047 | 0.6 | LS 7 |
| 1-LY11-0.6/120 | 1-LY13-0.6/120 | 1-LY1x-0.6/120 ^(*) | 120 | 0.6 0.024 | 1 0.039 | 5 0.197 | 3.2 0.126 | 1.5 | LS 7 |
| 1-LY11-1.5/120 | 1-LY13-1.5/120 | 1-LY1x-1.5/120 | 120 | 1.5 0.059 | 1.2 0.047 | 6.5 0.256 | 4.7 0.185 | 2.5 | LS 7 |
| 1-LY11-3/120 | 1-LY13-3/120 | 1-LY1x-3/120 | 120 | 3 0.118 | 1.6 0.063 | 8.5 0.335 | 4.5 0.177 | 4 | LS 7 |
| 1-LY11-3/120A | | 1-LY1x-3/120A | 120 | 3 0.118 | 1.6 0.063 | 8.5 0.335 | 4.5 0.177 | 4 | LS 7 |
| 1-LY11-6/120 | 1-LY13-6/120 | 1-LY1x-6/120 | 120 | 6 0.236 | 2.7 0.106 | 13 0.512 | 6 0.236 | 8 | LS 5 |
| 1-LY11-6/120A | | 1-LY1x-6/120A | 120 | 6 0.236 | 2.7 0.106 | 13 0.512 | 6 0.236 | 8 | LS 5 |
| 1-LY11-10/120 | 1-LY13-10/120 | 1-LY1x-10/120 | 120 | 10 0.394 | 4.6 0.181 | 18.5 0.728 | 9.5 0.374 | 13 | LS 5 |
| 1-LY11-10/120A | | 1-LY1x-10/120A | 120 | 10 0.394 | 4.6 0.181 | 18.5 0.728 | 9.5 0.374 | 13 | LS 5 |
| 1-LY11-1.5/350 | 1-LY13-1.5/350 | 1-LY1x-1.5/350 ^(*) | 350 | 1.5 0.059 | 1.2 0.047 | 5.7 0.224 | 4.7 0.185 | 4.5 | LS 7 |
| 1-LY11-3/350 | 1-LY13-3/350 | 1-LY1x-3/350 | 350 | 3 0.118 | 1.6 0.063 | 8.5 0.335 | 4.5 0.177 | 7 | LS 7 |
| 1-LY11-6/350 | 1-LY13-6/350 | 1-LY1x-6/350 | 350 | 6 0.236 | 2.8 0.11 | 13 0.512 | 6 0.236 | 13 | LS 5 |
| | | 1-LY1x-6/350A | 350 | 6 0.236 | 2.8 0.11 | 13 0.512 | 6 0.236 | 13 | LS 5 |
| 1-LY11-10/350 | | 1-LY1x-10/350 | 350 | 10 0.394 | 5.0 0.197 | 18.5 0.728 | 9.5 0.374 | 23 | LS 5 |
| | | 1-LY1x-10/350A | 350 | 10 0.394 | 5.0 0.197 | 18.5 0.728 | 9.5 0.374 | 23 | LS 5 |

En el código que define el tipo de galga extensométrica elegida en este caso, se definen las siguientes características:

1 - L Y 1 1 - 10 / 120

- 1** Standard
- L** Una sola galga Lineal
- Y** SG de la serie Y (rejilla de medición de constatan (55% Cu y 45% Ni) y soporte de poliamida)
- 1** Este número se refiere al diseño de la rejilla, tipo y posición, y a las conexiones
- 1** Se refiere a la temperatura correspondiente al acero
- 10** Longitud de la rejilla de medición de la galga extensométrica (10 mm)
- 120** Resistencia de la galga extensométrica (120 Ω)

Adhesivo

El adhesivo utilizado para pegar las galgas a la superficie de la madera es un adhesivo rápido cuya referencia es Z70 en el catálogo de HBM (Figura 6.8). Es el adhesivo recomendado por el fabricante para este tipo de galgas y para ser aplicado sobre madera. Se trata de un producto de un solo componente del grupo de los cianoacrilatos de fraguado rápido y ha sido especialmente diseñado para la instalación de este tipo de galgas extensométricas.

Es importante asegurarse de que la superficie sobre la que se va a aplicar el adhesivo esté completamente pulida y limpia para la correcta fijación de la galga. Además, es imprescindible esperar a que haya secado totalmente después de la colocación de las galgas.

Taladro

A la hora de elegir el taladro y la broca debe tenerse en cuenta el material a perforar y la dimensión del orificio. Para la realización de un taladro ciego a una profundidad exacta es recomendable un taladro con tope de profundidad y es aconsejable también utilizar un tope de broca. Para la correcta perforación del material va a utilizarse un taladro eléctrico con efecto percutor cuya potencia nominal de entrada es de 600W y su velocidad nominal va de 0 a 2800 rpm. La



Figura 6.8

Adhesivo de un componente utilizado para la colocación superficial de las galgas extensométricas (Fuente: Catalogo HBM)

herramienta dispone de una empuñadura auxiliar y un tope de profundidad.

Para taladrar orificios en madera de mayor diámetro, se recomienda utilizar barrenas o brocas de pala. En este caso, se utiliza una broca de pala de 18 mm (Figura 6.9). Este diámetro, elegido entre los tamaños comerciales disponibles, afecta a las relaciones que siguen la composición de la roseta y la profundidad del orificio.

Figura 6.9

Broca de pala de $\varnothing 18$ para madera utilizada en los ensayos



La distancia entre los límites del agujero y las bandas es suficiente para protegerlas de posibles daños que pueda causar la perforación y de los calentamientos superficiales que se puedan ocasionar durante la ejecución del orificio. Se ha previsto también la superficie que ocupa la instalación de la roseta (Figura 6.4). Se simplifica diciendo que se necesitará una superficie limpia y lijada que ocupa un cuadrado 60 mm de lado donde pueda inscribirse la roseta y teniendo en cuenta que habrá que realizar una soldadura para conectar cada una de las galgas electrónicamente al equipo de lectura, que necesitaran espacio sobre la superficie.

6.5 Ensayos de obtención de datos

El estado tensional en cada tipo de elemento estructural, según la función que desempeñe en el conjunto de la estructura, es diferente. En consecuencia, cabe la posibilidad de que la matriz de compliance varíe no solo en función de la especie arbórea de la que proceda la madera, sino que también influya el tipo de sollicitación a la que dé respuesta dicho elemento estructural. En arquitectura se encuentran fundamentalmente dos tipos de elementos constructivos lineales de madera: horizontales y verticales.

En horizontal, generalizando, todos aquellos elementos pensados para crear superficies y trabajando a flexión (principalmente forjados o cubiertas), y en posición vertical los elementos diseñados sujetar esas superficies trabajando a compresión (postes, pilares y pies derechos). Teniendo en cuenta este aspecto, el trabajo experimental se desglosa en dos fases fundamentales que dan respuesta a esas dos situaciones estructurales:

- **Fase I: Compresión**

En una fase inicial se llevarán a cabo los ensayos a compresión en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de San Sebastián, UPV/EHU.

• **Fase II: Flexión**

Los ensayos a flexión, correspondientes a una segunda fase, se llevarán a cabo en la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia, perteneciente a la Universidad de Valladolid.

Obviando las diferencias que puedan existir entre las dos fases que se plantean en el trabajo experimental, el proceso o el desarrollo de las tareas será similar: primero se realizará una puesta en carga para medir la elasticidad de las piezas en las direcciones X-Y, y después, bajo una carga constante final, se realizará la operación de Hole Drilling para medir las deformaciones de relajación de las tensiones relativas a esa carga tras realizar la perforación.

En ambas fases, se plantean ensayos en distintas direcciones de la fibra, en los que no se debe perder de vista el sistema de referencia geométrica anteriormente establecido (Figura 6.2). Para no perder esa referencia, la Figura 6.10 representa la posición relativa de las galgas extensométricas en distintas situaciones o posiciones de unas probetas genéricas: en todos los casos la galga extensométrica encargada de medir la deformación ϵ_1 será colocada de manera paralela a las fibras (rojo), la galga dispuesta de modo perpendicular a las fibras será la encargada de registrar en todos los casos la deformación ϵ_3 (azul) y la deformación ϵ_2 será registrada por la galga ubicada en el bisector (verde).

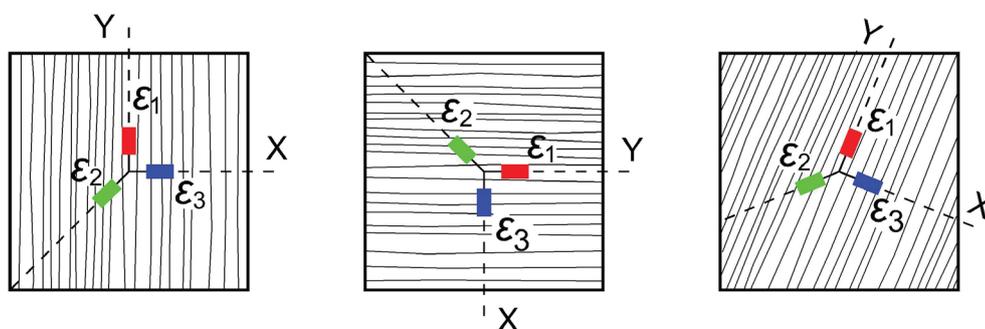


Figura 6.10

Esquema genérico de colocación de la roseta en función de la dirección de las fibras de la madera en cada tipo de probeta

Es importante mantener la referencia de la dirección de las fibras en todo momento debido a que el cálculo de la matriz de compliance depende absolutamente de este factor. La matriz, compuesta por nueve elementos distribuidos en tres filas y tres columnas, deberá calcularse por partes. La primera columna, compuesta por los elementos c_{11} , c_{21} y c_{31} está directamente relacionada con la tensión σ_y , ejercida en el eje Y paralelo a las fibras. La segunda columna, c_{12} , c_{22} y c_{32} , se relaciona con la tensión τ_{xy} . Finalmente, la tercera columna formada por las constantes elásticas c_{13} , c_{23} y c_{33} , se relaciona directamente con la tensión en el eje X, σ_x . El esfuerzo se dirige a estimar los valores de las estas constantes de compliance en el laboratorio donde las tensiones son conocidas, para definir el comportamiento del material tras su relajación.

6.5.1 Obtención de los módulos elásticos

Como se describe en la formulación, en las relaciones de ortotropía entran en juego los módulos elásticos del material en las direcciones X e Y, es decir el paralelo y el perpendicular a las fibras de la madera. Interesa conocer los valores de esos módulos elásticos en el punto exacto donde posteriormente se va a llevar a cabo la operación de Hole Drilling. En el proceso de cálculo se utilizarán los valores obtenidos empíricamente en los ensayos, que pueden diferir de los normalizados por varias razones, el tamaño de la probeta o el sistema empleado para medir deformaciones, entre otras.

Se aprovecharán las puestas en carga antes de realizar el agujero de taladro, pero ya con las bandas extensométricas correctamente adheridas en sus posiciones para ver las deformaciones que van tomando en los diferentes estados de carga y dibujar la gráfica tensión-deformación correspondiente.

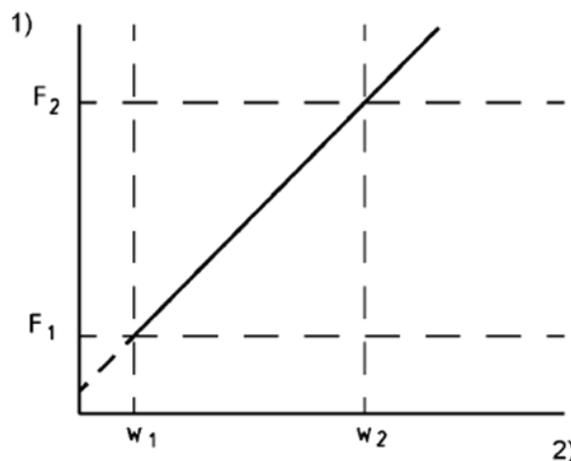


Figura 6.11
Gráfico de carga
(1)-deformación (2)
dentro de los márgenes
de deformación elástica
(Fuente: UNE-EN 408)

Es fundamental que el ensayo de Hole Drilling se realice dentro de la fase elástica del material y no en la plástica. Una estructura en servicio no debería pasar a esa segunda fase de plasticidad, y se considera, a efectos de cálculo, un material linealmente elástico. De modo que los módulos de Young se obtienen mediante las siguientes ecuaciones, según la Ley de Hooke.

Módulo de Young paralelo a las fibras, E_y

$$E_y = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_1}$$

Siendo:

E_y Módulo elástico en el eje Y, paralelo a las fibras (MPa)

ε_1 Deformación captada por la galga dispuesta en la dirección de las fibras ($\mu\text{m}/\text{m}$)

σ_y Tensión en el eje Y derivada de la puesta en carga (MPa)

Módulo de Young perpendicular a las fibras, E_x

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\epsilon_3}$$

Siendo:

E_x Módulo elástico en el eje X, perpendicular a las fibras (MPa)

ϵ_3 Deformación captada por la galga en la dirección perpendicular a las fibras ($\mu\text{m}/\text{m}$)

σ_x Tensión en el eje X derivada de la puesta en carga (MPa)

6.5.2 Obtención de la matriz de *compliance*

Tras medir la elasticidad de la pieza en el proceso de carga, se mantendrá una carga final y constante continuamente. Esa carga supondrá en la probeta una tensión interior y también en la superficie de la probeta. Bajo esa tensión conocida se podrá proceder a la operación de Hole Drilling.

En el proceso del ensayo, las galgas extensométricas deben ser adheridas en su posición antes de la aplicación de la carga. Esa carga supondrá tanto en el interior como en la superficie de la probeta una tensión conocida, bajo la cual se procederá a la perforación del agujero en el punto señalado previamente. La operación de taladrado es relativamente fugaz, y enseguida las tensiones existentes en la probeta se relajan dando lugar a unas deformaciones alrededor del mismo. Sin embargo debe esperarse hasta que las deformaciones sean constantes, es decir, hasta que el agujero realizado adquiera su forma definitiva.

El objetivo es relajar esas tensiones existentes en la superficie de la probeta mediante la perforación. A continuación se registrarán las deformaciones originadas en el perímetro del agujero resultante y se relacionarán con la tensión existente en la pieza antes de realizar la perforación. Para medir las deformaciones, previamente, deben disponerse las galgas formando una roseta según las medidas y las relaciones geométricas establecidas anteriormente en la Figura 6.4.

En el caso de la madera, debido a su condición de ortotropía, esas deformaciones alrededor del agujero no serán siempre iguales y dependerán del ángulo que formen la tensión ocasionada mediante la aplicación de una carga y la propia dirección de las fibras. Es decir, no es lo mismo realizar la perforación bajo una carga axial, perpendicular u oblicua (Figura 6.10).

Cada una de las tres columnas de la matriz de compliance en la Ecuación 1 está relacionada con la tensión en una dirección, es por eso que se proponen tres tipos de ensayo: axial, perpendicular y oblicuo. Al ejercer la carga en una sola

dirección, se simplifica el cálculo de las tensiones de las Ecuaciones 2, 3 y 4.

Ensayo axial

En el ensayo axial, la probeta es sometida a una tensión paralela a las fibras. La operación de Hole Drilling se realiza bajo una carga conocida y controlada en el laboratorio, por consiguiente que la tensión σ_y es fácilmente deducible. Las Ecuaciones 2, 3 y 4 se simplifican. Los módulos elásticos E_x y E_y han sido calculados previamente y los valores de la deformación ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) se registran experimentalmente una vez realizado el taladrado y se han estabilizado las deformaciones definitivas. Despejando las Ecuaciones simplificadas 5, 6 y 7 se obtienen los valores de las constantes elásticas (c_{11}, c_{21} y c_{31}) que componen la primera columna de la matriz.

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}$$

Ecuación 5

$$c_{11} \sigma_y = \sqrt{E_x E_y} \epsilon_1 \rightarrow c_{11} = \frac{\sqrt{E_x E_y} \epsilon_1}{\sigma_y}$$

Ecuación 6

$$c_{21} \sigma_y = \sqrt{E_x E_y} \epsilon_2 \rightarrow c_{21} = \frac{\sqrt{E_x E_y} \epsilon_2}{\sigma_y}$$

Ecuación 7

$$c_{31} \sigma_y = \sqrt{E_x E_y} \epsilon_3 \rightarrow c_{31} = \frac{\sqrt{E_x E_y} \epsilon_3}{\sigma_y}$$

Ensayo perpendicular

De manera análoga se pueden calcular los valores de las constantes elásticas que forman la tercera columna de la matriz de compliance. En este caso, se carga la probeta en la dirección perpendicular a las fibras. La carga aplicada, conocida y controlada, es perpendicular a la dirección de las fibras, por consiguiente que la tensión σ_x es fácilmente deducible. Los módulos elásticos E_x y E_y han sido calculados previamente y los valores de la deformación ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) se registran experimentalmente una vez realizado el taladrado y se han estabilizado las deformaciones definitivas. Despejando las Ecuaciones simplificadas 8, 9 y 10 se obtienen los valores de las constantes elásticas (c_{13}, c_{23} y c_{33}) que componen la tercera columna de la matriz.

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}$$

$$c_{13} \sigma_x = \sqrt{E_x E_y} \varepsilon_1 \rightarrow c_{13} = \frac{\sqrt{E_x E_y} \varepsilon_1}{\sigma_x}$$

Ecuación 8

$$c_{23} \sigma_x = \sqrt{E_x E_y} \varepsilon_2 \rightarrow c_{23} = \frac{\sqrt{E_x E_y} \varepsilon_2}{\sigma_x}$$

Ecuación 9

$$c_{33} \sigma_x = \sqrt{E_x E_y} \varepsilon_3 \rightarrow c_{33} = \frac{\sqrt{E_x E_y} \varepsilon_3}{\sigma_x}$$

Ecuación 10

Ensayo oblicuo

Para calcular los valores de las constantes elásticas que componen la segunda columna, debe ejercerse una tensión en una dirección intermedia entre X e Y. La nueva dirección en la que ejercer la tensión oblicua será denominada Y', formando un ángulo β con el sistema de referencia original (Figura 6.12). Los elementos c_{12} y c_{32} son iguales a cero por coincidir las principales direcciones elásticas del material con los ejes principales de la roseta que forman las galgas de deformación (Schajer, Yang 1994). Por tanto, solamente ha de calcularse el valor de c_{22} , el elemento central de la matriz. Se le denominará $\sigma_{Y'}$ a la tensión ejercida en la nueva dirección oblicua (Y'). Será un valor conocido que habrá que transportar al sistema de referencia original.

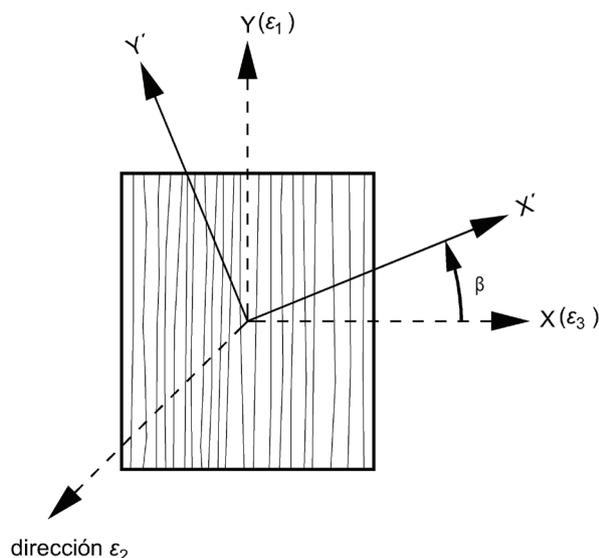


Figura 6.12
Sistemas de referencia X-Y y X'-Y' superpuestos

Es preciso realizar una operación de cambio de ejes para devolver el valor de la tensión σ_y (conocida en el sistema de referencia X'-Y') al sistema de referencia original. En estado plano de tensiones, el paso del tensor de tensiones (T') en los ejes X'-Y' al tensor (T) en los ejes X-Y se realiza mediante una operación matemática convencional.

$$T = A^t T' A$$

Siendo:

T Tensor de tensiones en el plano X-Y, formado por $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$

A^t Matriz traspuesta Matriz Auxiliar (A) de cambio de ejes

T' Tensor de tensiones en el plano X'-Y', actuando solamente σ_y en la dirección Y'

A Matriz Auxiliar de cambio de ejes

La matriz A, matemáticamente es una matriz de trigonometría y está compuesta por dos filas y dos columnas. El ángulo β es el ángulo existente entre ambos sistemas de referencia. T representa el tensor de tensiones en el sistema de referencia original (X-Y) y T', el nuevo tensor de tensiones, compuesto por la tensión ejercida en la dirección Y'. A^t es la matriz traspuesta de A.

$$T = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{pmatrix} \quad T' = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y'} \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} \cos\beta & \text{sen}\beta \\ -\text{sen}\beta & \cos\beta \end{pmatrix}$$

Por tanto,

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & -\text{sen}\beta \\ \text{sen}\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & \text{sen}\beta \\ -\text{sen}\beta & \cos\beta \end{pmatrix}$$

O bien,

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{y'} \text{sen}^2\beta \\ -\sigma_{y'} \text{sen}\beta \cos\beta \\ \sigma_{y'} \cos^2\beta \end{pmatrix}$$

Se ha dejado para el final ya que para resolver la Ecuación 11 deben conocerse previamente los valores de otras de las constantes de compliance, c_{21} y c_{23} . Una vez hecho el cambio de ejes, y habiendo conocido los valores de las constantes involucradas en la Ecuación 3, se puede continuar con el cálculo de la segunda

columna de la matriz de compliance, en el que únicamente será necesario despejar la constante central, c_{22} .

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}$$

Ecuación 11

$$c_{21} \sigma_y \cos^2 \beta + c_{22} (-\sigma_y \sin \beta \cos \beta) + c_{23} \sigma_y \sin^2 \beta = \sqrt{E_x E_y} \varepsilon_2 \rightarrow$$

$$c_{22} = \frac{\sqrt{E_x E_y} \varepsilon_2 - c_{21} \sigma_y \cos^2 \beta - c_{23} \sigma_y \sin^2 \beta}{-\sigma_y \sin \beta \cos \beta}$$

Este ensayo puede servir, además, para comprobar los valores de las constantes de compliance c_{11} , c_{13} , c_{31} y c_{33} , calculadas previamente, introduciendo sus valores en las Ecuaciones 12 y 13, relativas a este ensayo.

$$c_{11} \sigma_y \cos^2 \beta + c_{13} \sigma_y \sin^2 \beta = \sqrt{E_x E_y} \varepsilon_1$$

Ecuación 12

$$c_{31} \sigma_y \cos^2 \beta + c_{33} \sigma_y \sin^2 \beta = \sqrt{E_x E_y} \varepsilon_3$$

Ecuación 13

6.5.3 Ensayos de comprobación de los datos obtenidos

Una vez deducidos en laboratorio los valores de los módulos elásticos principales (E_x y E_y) y de las constantes de compliance (c_{ij}), deben comprobarse la validez de esos datos antes de pasar a la aplicación de la técnica para medir el estado tensional en una estructura real. Para realizar esa comprobación se compararán los valores de la tensión aplicada mediante una carga conocida en el laboratorio con los valores calculados mediante la formulación de Hole Drilling. También serán denominados ensayos “a ciegas” porque lo que se pretende es llegar a calcular la tensión existente en la probeta sin mirar el valor de la carga aplicada mediante la máquina hasta el final. En definitiva, se trata de realizar el camino inverso, y despejar en este caso el tensor de tensiones.

$$\begin{pmatrix} \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \sigma_x \end{pmatrix} = \sqrt{E_x E_y} \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{pmatrix}$$

1. Estado tensional real desconocido

2. Módulos de elasticidad principales en la superficie

3. Matriz de *compliance* inversa conocida

4. Deformaciones de Hole Drilling alrededor de la perforación

Los valores desconocidos son ahora σ_y , τ_{xy} y σ_x , mientras que las constantes de compliance (c_{ij}) han sido deducidas en el laboratorio y las deformaciones ε_i se obtienen en el momento de la perforación de Hole Drilling en el ensayo.

Matemáticamente, la inversa de la matriz de compliance se deduce mediante la siguiente expresión:

$$C^{-1} = \frac{1}{|C|} \cdot adj(C)$$

Siendo:

C^{-1} Matriz inversa de la matriz de *compliance*(C)

$|C|$ Determinante de la matriz de *compliance*(C)

$adj(C)$ Matriz de adjuntos de la matriz de *compliance* (C)

La comprobación en el laboratorio es directamente análoga y previa a la comprobación en una estructura real en servicio. Sin embargo, es recomendable antes de acudir a la realización del ensayo en una estructura real, cerciorarse de que los valores obtenidos en el laboratorio son válidos y que realmente definen el comportamiento de los elementos estructurales.

Capítulo 7

ENSAYOS DE LABORATORIO Y RESULTADOS

Habiendo planteado la aplicación de la técnica a nivel teórico en el capítulo anterior, se continúa con la práctica de los ensayos en los laboratorios. Se reitera que desde un primer momento el proceso experimental de la puesta a punto de la técnica de Hole Drilling sobre elementos de madera se divide en dos fases: Por un lado los ensayos de compresión y, por el otro, los ensayos de flexión.

7.1 Fase I: Compresión

Los ensayos de compresión controlada en el laboratorio sirven para estudiar y definir el comportamiento elástico-mecánico de las probetas, pudiendo extrapolarse a una estructura real en servicio bajo este mismo tipo de sollicitación.

Esta etapa de la investigación duró varios meses y fue llevada a cabo en la Escuela Técnica y Superior de Arquitectura de Donostia-San Sebastián (UPV/EHU). El objetivo de los ensayos fue identificar los módulos elásticos principales y las constantes de *compliance* para poder determinar y definir un comportamiento en piezas de madera de pino radiata.



Figura 7.1

Laboratorio en la E.T.S. de Arquitectura de Donostia-San Sebastián (UPV/EHU)

7.1.1 Preparación del ensayo

La máquina de compresión disponible en el laboratorio (Figura 7.1) ejerce fuerza en una sola dirección (vertical). Con el fin de calcular las constantes elásticas que definen la matriz de compliance, deben diseñarse distintas probetas que permitan la compresión en las distintas direcciones planteadas.

Compresión axial

Se aplica la carga en dirección paralela a las fibras de madera, de modo que la probeta debe colocarse verticalmente, con las fibras paralelas al eje de carga de la máquina. De este modo la tensión normal (σ_y) solamente existe en el eje Y. Este ensayo servirá para medir el módulo elástico E_y y para determinar las constantes de compliance de la primera columna de la matriz.

Compresión perpendicular

En este caso la probeta debe colocarse de manera horizontal, de manera que las fibras de la madera formen un ángulo de 90° con la dirección de aplicación de la carga. La tensión normal (σ_x) existente solamente actúa en el eje X. Este ensayo servirá para medir el módulo elástico E_x y para determinar las constantes de compliance de la tercera columna de la matriz.

Compresión oblicua

En este caso la carga aplicada debe formar un ángulo intermedio con la dirección de las fibras de la probeta. Este ensayo es de realización compleja y requiere el diseño de una probeta especial (Figura 7.2).

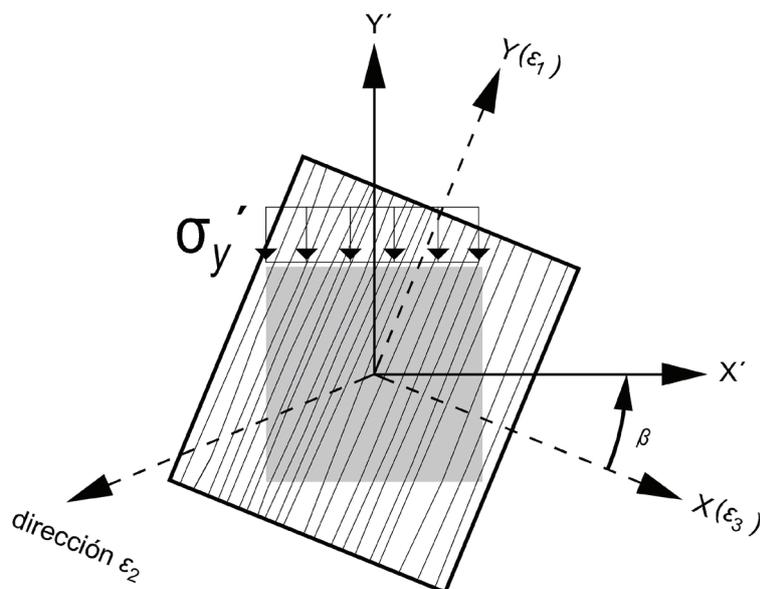


Figura 7.2

Planteamiento de extracción de la probeta especial para el ensayo de compresión oblicua en el eje Y'

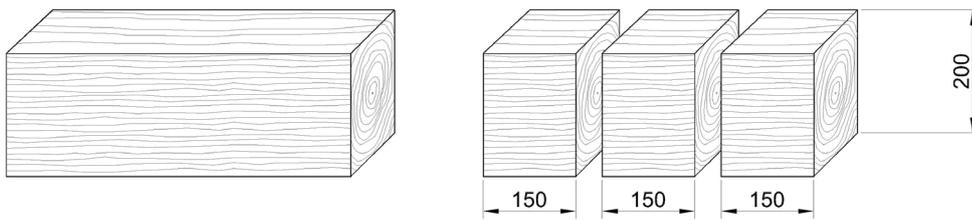


Figura 7.3

Obtención de las probetas originales a partir de una viga estructural

Partiendo de las vigas estructurales, cuya sección transversal mide 200 mm de lado, se realizará un primer corte transversal cada 150 mm para extraer las probetas (Figura 7.3). A esa primera probeta se le denomina probeta o bloque original, sirviendo para la realización de los ensayos de compresión axial y perpendicular (Figura 7.4). La misma probeta será sometida a dos tipos de compresión: primero axialmente en una cara (1) y, después, perpendicularmente en la cara opuesta (2).

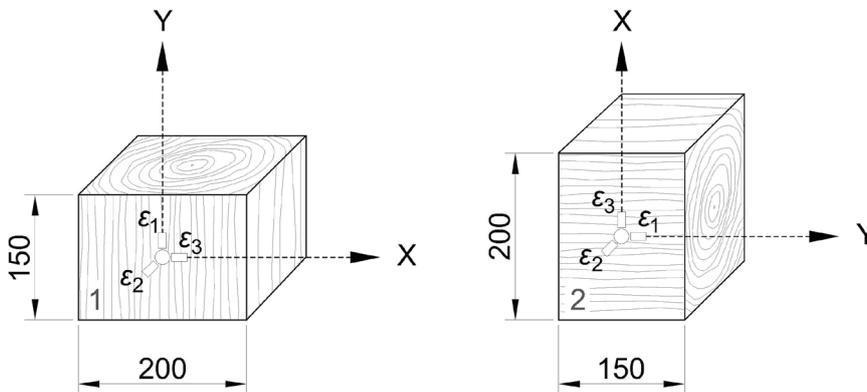


Figura 7.4

Probeta original para el ensayo de compresión axial (Cara 1) y para la compresión perpendicular (Cara 2), en las caras opuesta y giradas 90°

Una vez se hayan concluido las dos compresiones anteriores, se continuará con el ensayo de compresión oblicua. Se requiere una segunda probeta para este ensayo, a la que se le denomina "especial". Esta segunda probeta es extraída de la probeta original (Figura 7.5).

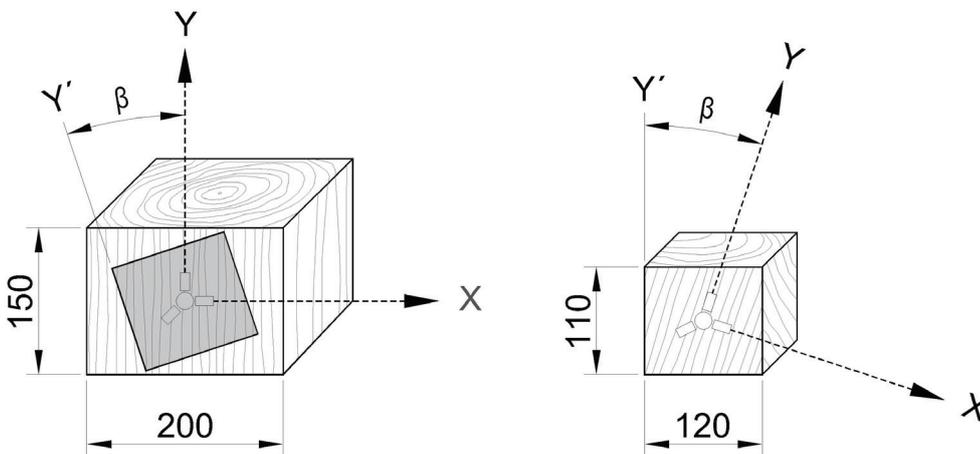
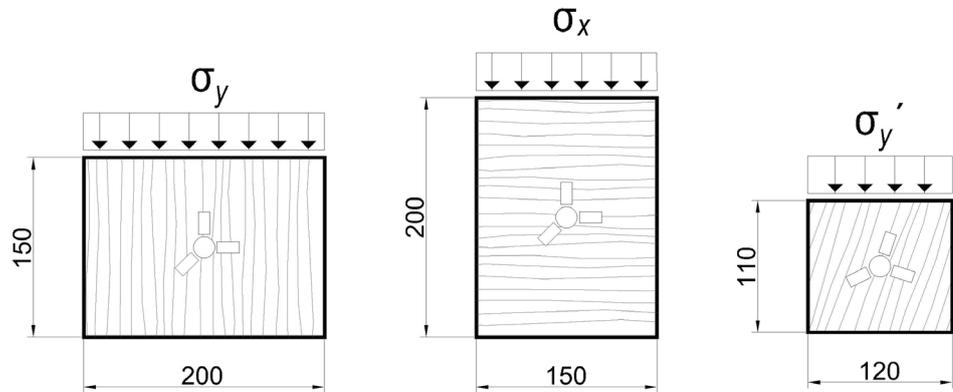


Figura 7.5

Probeta especial extraída a partir de la original

En resumen, la Figura 7.6 representa las distintas opciones de realización de los ensayos de compresión, ejerciendo la tensión cada vez en un eje distinto según la dirección relativa de la fibra de la madera.

Figura 7.6
Ensayos de compresión según la dirección de la tensión ejercida en cada tipo de probeta en relación con la dirección de las fibras de la madera

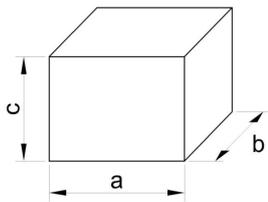


La Norma UNE-EN 408 propone que para que una madera estructural sea considerada de gruesa escuadría (MEG), el ancho de la sección de ser igual o mayor que 70 mm. Esa condición se cumple en los tres tipos de probetas (Tabla 7.1), donde **a** y **b** son las dimensiones que delimitan la superficie de contacto con las mordazas de la máquina de compresión y **c** la altura de la probeta, medido en milímetros.

Tabla 7.1

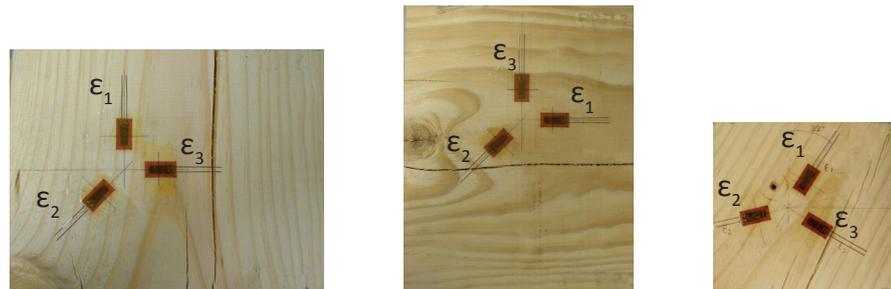
Dimensiones de las probetas según el tipo de compresión uniaxial

| | a (mm) | b (mm) | c (mm) |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Compresión axial | 200 | 200 | 150 |
| Compresión perpendicular | 200 | 150 | 200 |
| Compresión oblicua | 120 | 110 | 140 |



Finalmente, la Figura 7.7 muestra la realidad de las probetas con la roseta formada por galgas extensométricas individuales. Se trata de tres fotografías de la misma una misma probeta. A la izquierda, el bloque original, preparado para ser ensayado a compresión axial en la Cara 1. En el centro, el mismo bloque pero girado 90° y mostrado por la cara opuesta, para ser ensayado a compresión perpendicular, Cara 2. A la derecha, la probeta especial extraída del mismo bloque anteriormente ensayado a compresión axial y perpendicular, en el que puede verse la señal de la perforación realizada en los ensayos previos.

Figura 7.7
Ejemplos reales de los la misma probeta en distintas situaciones según la compresión a la que vaya a ser sometida: de izquierda a derecha, axial, perpendicular y oblicua



La realidad de la ejecución difiere del planteamiento teórico en cuanto a la colocación de la roseta en el centro geométrico de la pieza (Figura 7.6 y Figura 7.7). El hecho de que se analicen piezas de sección estructural supone también tener que sortear fendas, nudos y demás singularidades o propias de la madera, a veces considerados defectos y teniendo que ser eludidos a la hora de adherir las galgas. Además en el caso de las probetas especiales, como en el caso de la fotografía de la derecha en la Figura 7.7, al extraer la pieza de la probeta original a menudo quedan restos de la perforación anterior que deberán evitarse del mismo modo al colocar las galgas.

7.1.2 Resultados de los módulos elásticos

Los valores de los módulos elásticos se obtienen a través de la pendiente de las gráficas de tensión-deformación durante el proceso de carga en cada ensayo. El proceso de carga de la probeta será realizado en cinco pasos hasta alcanzar la carga definitiva, bajo la que se realizará la perforación. A cada valor de la carga le corresponde una deformación elástica diferente.

Paralelo a las fibras, E_y

Durante la carga axial en el bloque original (Figura 7.8), se recogen las deformaciones elásticas del proceso a través de las galgas extensométricas. Para medir el módulo elástico E_y basta con registrar y anotar las deformaciones relativas a Galga 1 (*Gage 1*), paralela a la dirección de las fibras de la madera.



Figura 7.8
Probeta axial sometida a compresión paralela a las fibras durante el proceso de carga antes de realizar el taladro

El software utilizado en el proceso experimental representa las deformaciones a tiempo real según se muestra en la Figura 7.9. En este caso solo se han representado los valores relativos a la deformación ϵ_1 . En el eje de abscisas se representa el tiempo de duración del ensayo (min) y en el de ordenadas las deformaciones ($\mu\text{m}/\text{m}$) en cada estado de la carga.

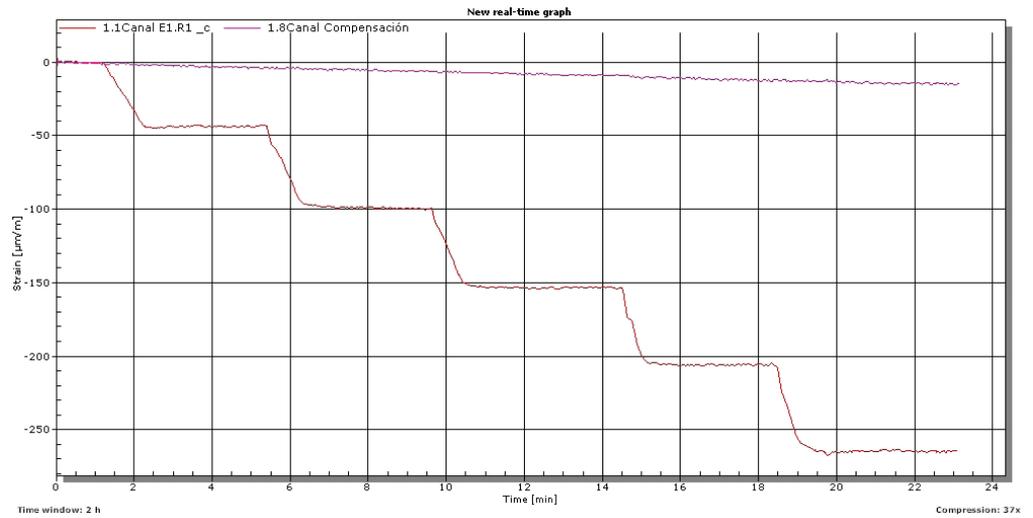


Figura 7.9

Ejemplo de puesta en carga del Bloque 10 en compresión paralela a las fibras

Se traduce la gráfica anterior, en la que solamente se muestran los valores de las deformaciones con respecto al tiempo, en la siguiente tabla donde se incluyen también los valores de la tensión correspondiente a cada valor de la carga (Tabla 7.2).

Tabla 7.2

Datos necesarios para el cálculo del módulo elástico E_y (Ejemplo Bloque 10)

| B10, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -13 | -29 | -44,7 | -59,5 | -74 |
| σ_y (MPa) | -0,51 | -1,14 | -1,75 | -2,33 | -2,90 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m}/\text{m}$) | -44 | -99 | -153 | -206 | -265 |
| E_y (MPa) | 10871 | | | | |

Finalmente, los datos tabulados son de nuevo representados en una gráfica nueva (Figura 7.10), en la que la pendiente entre la tensión σ_y y la deformación ϵ_1 es la que proporciona el valor de la propiedad elástica E_y .

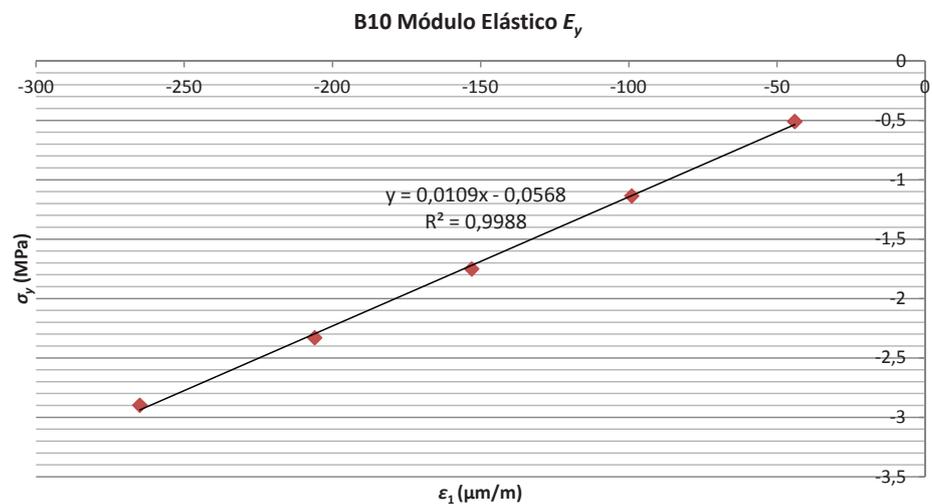


Figura 7.10

Gráfica correspondiente a la tensión-deformación de cada punto en uno de los bloques cogido como ejemplo (Bloque 10)

Los cinco puntos alineados forman a una recta que responde a una ecuación ($y= bx + a$), siendo b la pendiente y por tanto el valor del módulo elástico. En el caso del Bloque 10 la recta se ajusta a la ecuación $y = 0,0109x - 0,0568$. La pendiente de la recta representa el valor del módulo elástico, que para ser ajustado a la magnitud MPa debe ser multiplicado por 10^6 , es decir $E_y = 10871$ MPa. R^2 es el coeficiente de determinación, que hace referencia al ajuste de los puntos analizados con la propia recta del Módulo Elástico, cuando más se acerque ese número a 1, más ajustado será el valor del módulo elástico. En este caso $R^2= 0,9988$, indicando que los valores obtenidos en el proceso de carga se ajustan a la perfección a la recta. En el Anexo 1 pueden verse los datos tabulados y gráficos del resto de los bloques ensayados.

La Tabla 7.3 y la Figura 7.11 recogen los resultados de los Módulos Elásticos E_y en cada bloque ensayado y la Tabla 7.4 sirve como resumen del estudio estadístico de los valores obtenidos en la totalidad de los ensayos de compresión axial.

Tabla 7.3

Resultados de los diez bloques ensayados en compresión paralela a las fibras para la obtención del Módulo Elástico E_y

| | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | B10 |
|----------------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| E_y (MPa) | 13492 | 6221 | 8074 | 12333 | 18823 | 3393 | 13339 | 18702 | 12107 | 10871 |

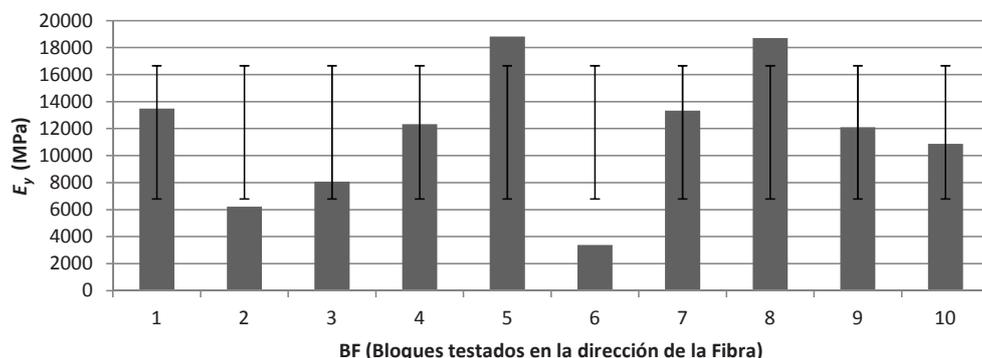


Figura 7.11
Gráfico de barras de los resultados de los módulos elásticos de los diez bloques ensayados a compresión paralela a las fibras

Tabla 7.4

Medidas de dispersión de los valores obtenidos

| | Media | Máx. | Min. | Rango | Varianza | Desv. Típica | Coef. Variación | E.S.M. | Tamaño muestra |
|----------------|-------|-------|------|-------|----------|--------------|-----------------|--------|----------------|
| E_y (MPa) | 11736 | 18823 | 3393 | 15430 | 2190642 | 1480 | 12,6 | 468 | 10 |

Nota: El bloque B6 es el valor más lejano (por abajo), pero no es un *outlier* significativo ($P>0,05$)

Perpendicular a las fibras, E_x

Del mismo modo, antes de realizar el agujero de Hole Drilling en la cara opuesta, la que va ser comprimida de manera transversal a las fibras (Figura 7.12), se realiza la puesta en carga midiendo las deformaciones en cada uno de los cinco puntos. Para medir el módulo elástico E_x , basta con registrar los datos referidos a la deformación en la Galga 3 (*Gage 3*), adherida en la dirección perpendicular a las fibras de la madera y el dirección paralela a la carga aplicada.



Figura 7.12

Probeta perpendicular sometida a compresión perpendicular a las fibras durante el proceso de carga, antes de realizar el taladro

El software utilizado permite recibir una gráfica de las deformaciones a tiempo real (Figura 7.13), en el que el eje de abscisas se representa el tiempo del ensayo (min) y en el de ordenadas las deformaciones ϵ_3 ($\mu\text{m}/\text{m}$) en cada estado de la carga.

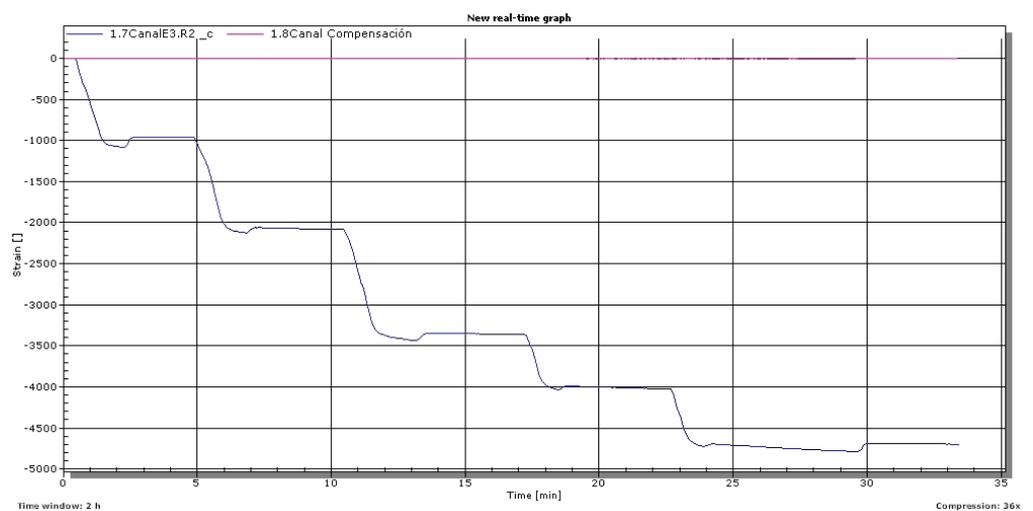


Figura 7.13

Ejemplo de puesta en carga del Bloque 10 en compresión transversal a las fibras. La línea azul indica la deformación en la Galga 3

Se traduce la gráfica anterior, en la que solamente se muestran los valores de las deformaciones con respecto al tiempo, en la siguiente tabla donde se

incluyen también los valores de la tensión correspondiente a cada valor de la carga (Tabla 7.5).

Tabla 7.5

Datos necesarios para el cálculo del módulo elástico E_x (Ejemplo Bloque 10)

| B10, compresión transversal a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -10 | -22,5 | -36 | -45,5 | -52 |
| σ_x (MPa) | -0,34 | -0,77 | -1,23 | -1,55 | -1,78 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -958 | -2080 | -3362 | -4020 | -4697 |
| E_x (MPa) | 387 | | | | |

Finalmente, los datos tabulados son de nuevo representados en una gráfica nueva (Figura 7.14), en la que la pendiente entre tensión σ_x y deformación ϵ_3 es la que proporciona el valor de la propiedad elástica E_x .

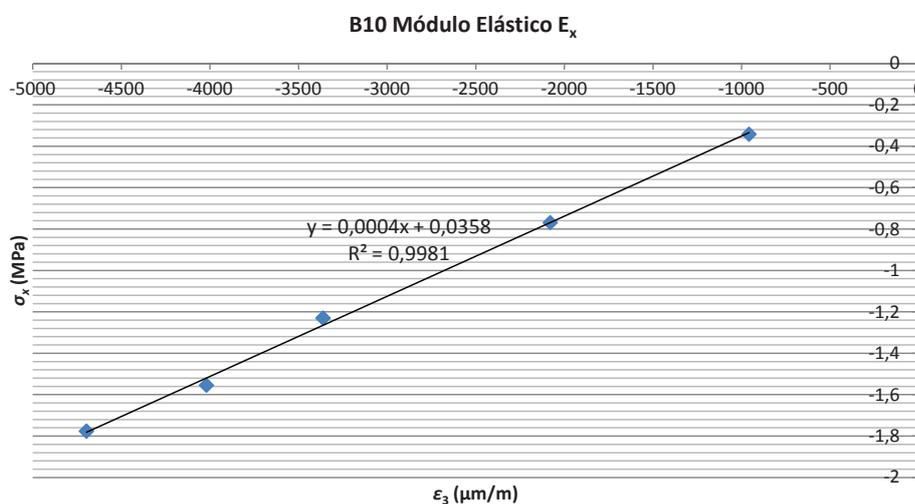


Figura 7.14

Gráfica correspondiente a la tensión-deformación de cada punto en uno de los bloques cogido como ejemplo (Bloque 10)

En este caso los cinco puntos se ajustan a una recta que responde a la ecuación $y = 0,0004x + 0,0358$. La pendiente coincide con el valor del módulo elástico, ajustado a la magnitud, $E_x = 387$ MPa. R^2 es el coeficiente de determinación, en este caso tan cercano a 1 que indica que los valores obtenidos en el proceso de carga se ajustan a la perfección a la recta. En el Anexo 1 pueden visualizarse las tablas y las gráficas correspondientes a los diez tacos ensayados en esta fase.

La Tabla 7.6 y la Figura 7.15 recogen los resultados de los Módulos Elásticos E_x en cada bloque ensayado y la Tabla 7.7 sirve como resumen del estudio estadístico de los valores obtenidos en la totalidad de los ensayos de compresión perpendicular.

Tabla 7.6

Resultados de los diez bloques ensayados en compresión perpendicular a las fibras para la obtención del Módulo Elástico E_x

| | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | B10 |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| E_x (MPa) | 167 | 295 | 706 | 414 | 332 | 2020 | 979 | 423 | 482 | 387 |

Figura 7.15

Gráfico de barras de los resultados de los módulos elásticos de los diez bloques ensayados a compresión perpendicular a las fibras

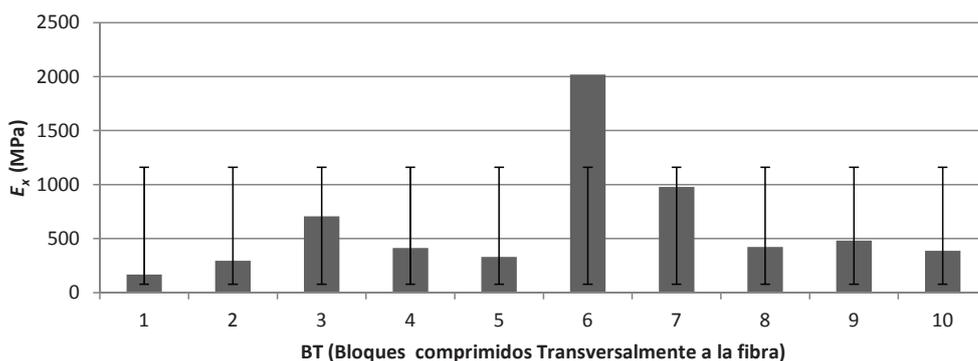


Tabla 7.7

Medidas de dispersión de los valores obtenidos

| | Media | Máx. | Min. | Rango | Varianza | Desv. Típica | Coef. Variación | E.S.M. | Tamaño muestra |
|----------------------------|-------|------|------|-------|----------|--------------|-----------------|--------|----------------|
| E_x (MPa) | 621 | 2020 | 167 | 1853 | 264465 | 514 | 82,8 | 163 | 10 |

Existe una razón para tomar el valor promedio de los ensayos realizados, y es que la Norma UNE-EN 338 asigna un valor característico, es decir, del 5º percentil para propiedades de rotura y de densidad y un valor medio para el módulo de elasticidad.

Los valores medios de los módulos de elasticidad principales obtenidos en los ensayos de compresión son los siguientes:

$$E_y = 11736 \text{ MPa}$$

$$E_x = 621 \text{ MPa}$$

7.1.3 Resultados de la matriz de *compliance*

Los valores de los componentes de la matriz de compliance se calculan tras recoger las deformaciones de relajación del material alrededor de la perforación. Para el registro de esas deformaciones se utiliza el mismo software utilizado para la medición de los módulos elástico, capaz de representar a tiempo real los valores que van tomando las deformaciones. En el eje de abscisas se representa el tiempo de realización del ensayo (min) y en el de ordenadas las deformaciones ($\mu\text{m}/\text{m}$). En esta ocasión se visualizan y registran simultáneamente los datos de las tres galgas tras la operación de Hole Drilling. En todos los casos la línea roja representa la deformación ϵ_1 , la línea azul la deformación ϵ_3 y la línea verde la deformación ϵ_2 .

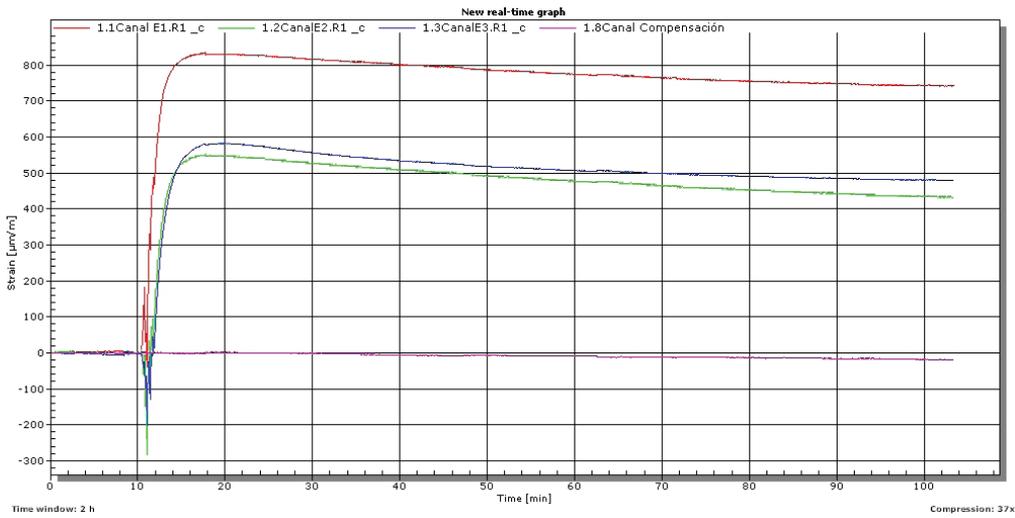


Figura 7.16
Ejemplo de las deformaciones de Hole Drilling en un bloque original por la Cara 1 (compresión paralela a las fibras)

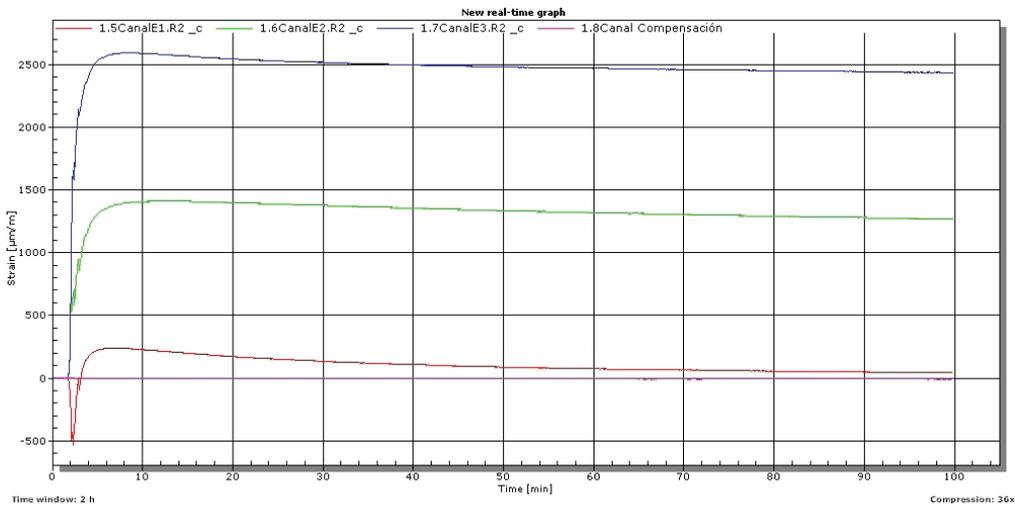


Figura 7.17
Ejemplo de las deformaciones de Hole Drilling en un bloque original por la Cara 2 (compresión transversal a las fibras)

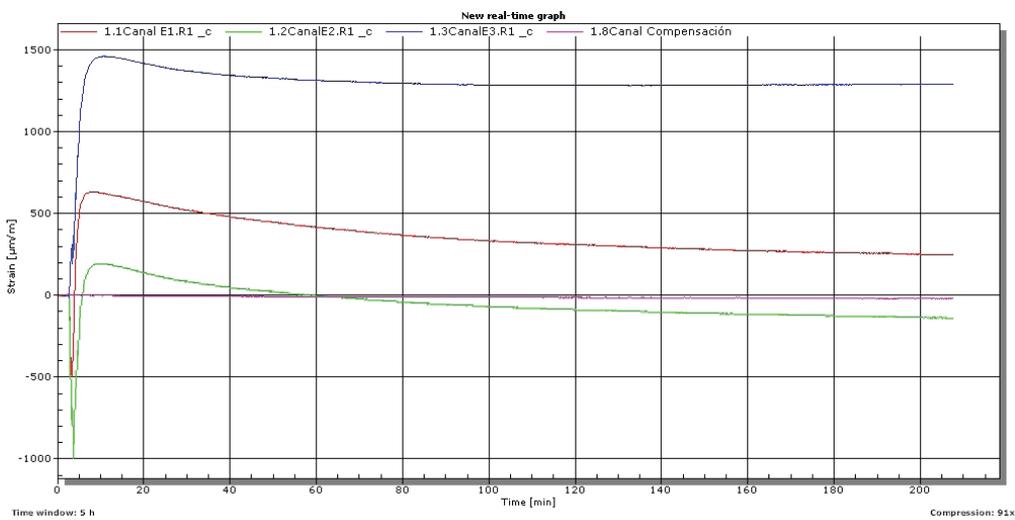


Figura 7.18
Ejemplo de las deformaciones de Hole Drilling en un bloque especial (compresión oblicua a las fibras)

Las Figuras 7.16, 7.17 y 7.18 son ejemplos de las deformaciones de relajación por Hole Drilling en las gráficas recogidas en cada tipo de los ensayos de compresión, axial, perpendicular y oblicua.

Bajo una carga conocida, en la que se procederá a realizar la perforación a continuación, se considera que los valores de las deformaciones iniciales en las galgas son iguales a cero. En la Figura 7.16, por ejemplo, el inicio de la gráfica representa el inicio del ensayo con todas las bandas emitiendo una deformación considerada inicial o nula ($\epsilon_i = 0$). En una estructura real, esa deformación inicial no es nula, sino que corresponde a la carga y acciones que soporta un determinado elemento. En la gráfica (Figura 7.16), el salto que se produce en el 10' refleja el momento exacto de la realización del agujero, en el que todas las deformaciones se disparan hasta que paulatinamente alcanzan una deformación estable y representativa. En el 100' del ensayo, se considera que las deformaciones son suficientemente estables y se detiene. Esos valores de deformación representan la relajación del material en el perímetro de agujero, sirviendo para calcular las constantes de *compliance*.



Figura 7.19

Imágenes correspondientes al momento inmediatamente posterior a haber realizado la perforación en los tres ensayos diferentes de compresión

Resultados 1ª columna de la matriz

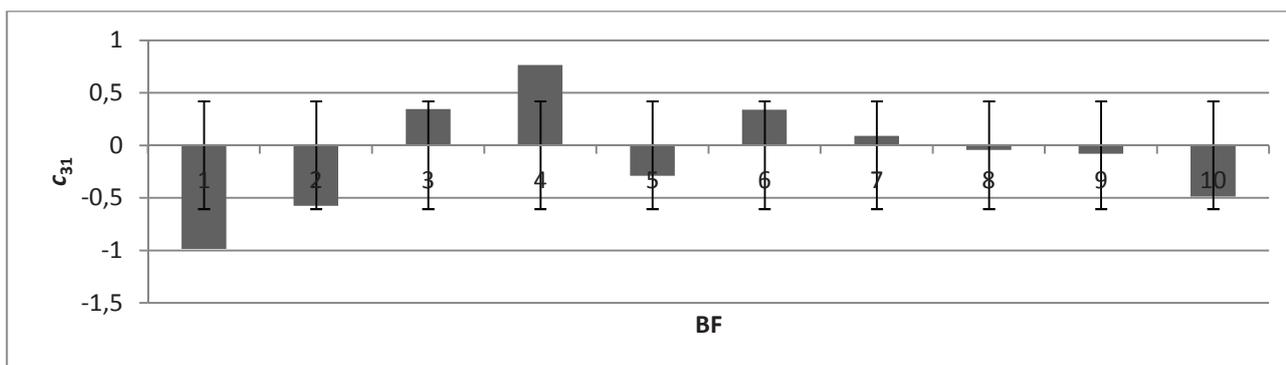
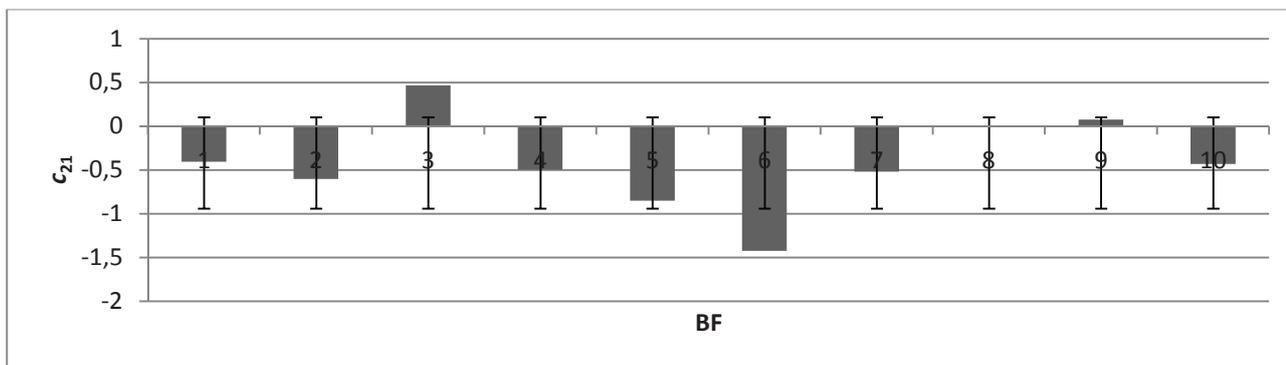
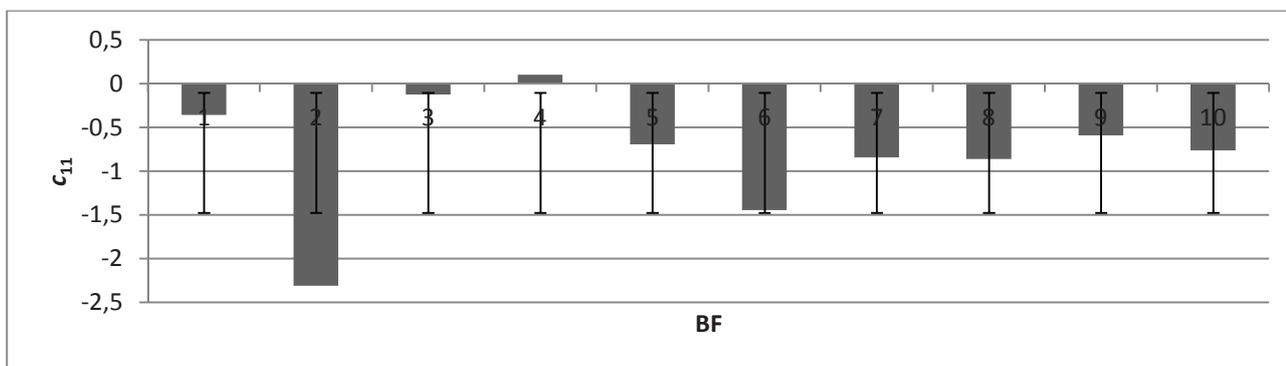
A través de los valores de las deformaciones obtenidas tras la operación de Hole Drilling en las inmediaciones del agujero, bajo una compresión axial en la Cara 1 (Figura 7.19, izquierda) y resolviendo las ecuaciones correspondientes, se obtienen los valores de los elementos que forman la primera columna de la matriz en cada bloque (c_{11} , c_{21} y c_{31}).

Tabla 7.8

Valores de las constantes de *compliance* de la primera columna de la matriz en los ensayos de compresión en la dirección de las fibras (Cara 1)

| | BF1 | BF2 | BF3 | BF4 | BF5 | BF6 | BF7 | BF8 | BF9 | BF10 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| c_{11} | -0,359 | -2,309 | -0,124 | 0,101 | -0,693 | -1,443 | -0,843 | -0,862 | -0,591 | -0,762 |
| c_{21} | -0,407 | -0,601 | 0,465 | -0,498 | -0,849 | -1,422 | -0,519 | -0,007 | 0,077 | -0,431 |
| c_{31} | -0,986 | -0,574 | 0,344 | 0,764 | -0,288 | 0,338 | 0,089 | -0,042 | -0,081 | -0,487 |

BFn: B. Bloque F. Carga en la dirección de las Fibras n. Número del bloque ensayado



Resultados 3ª columna de la matriz

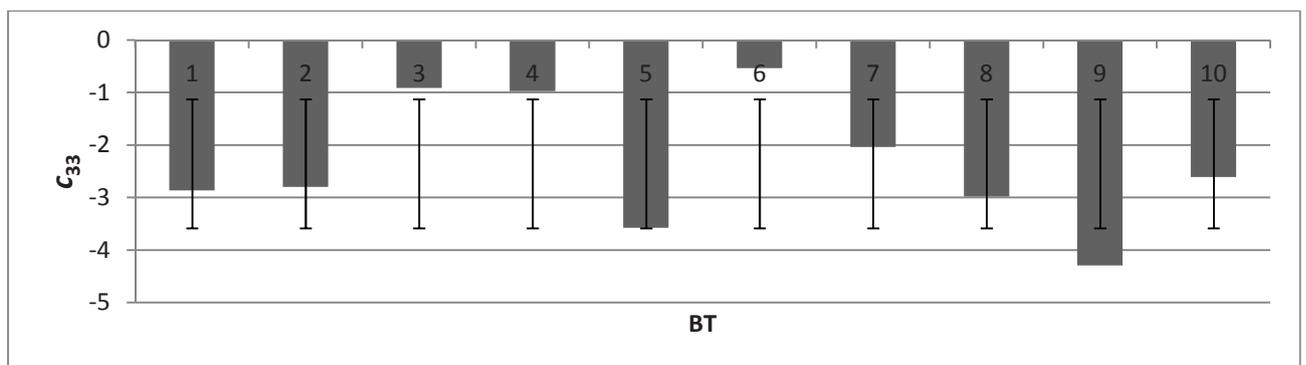
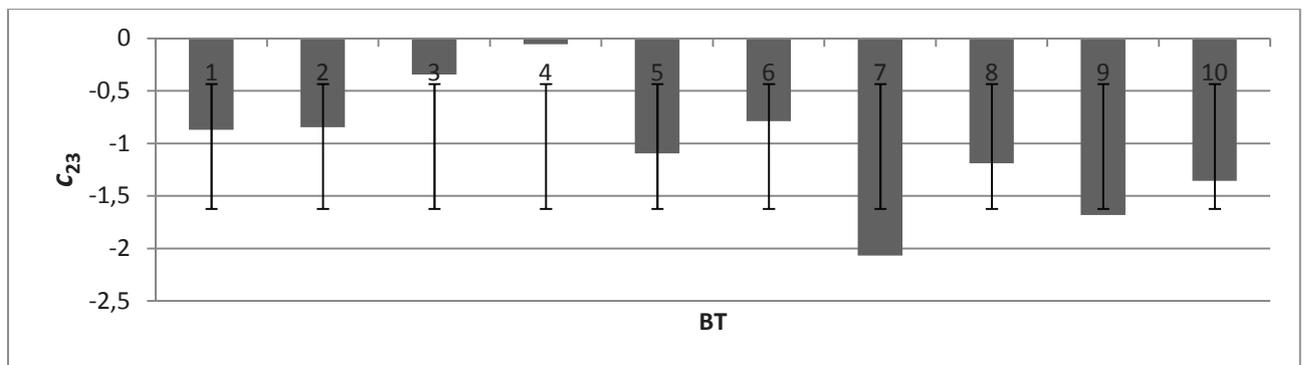
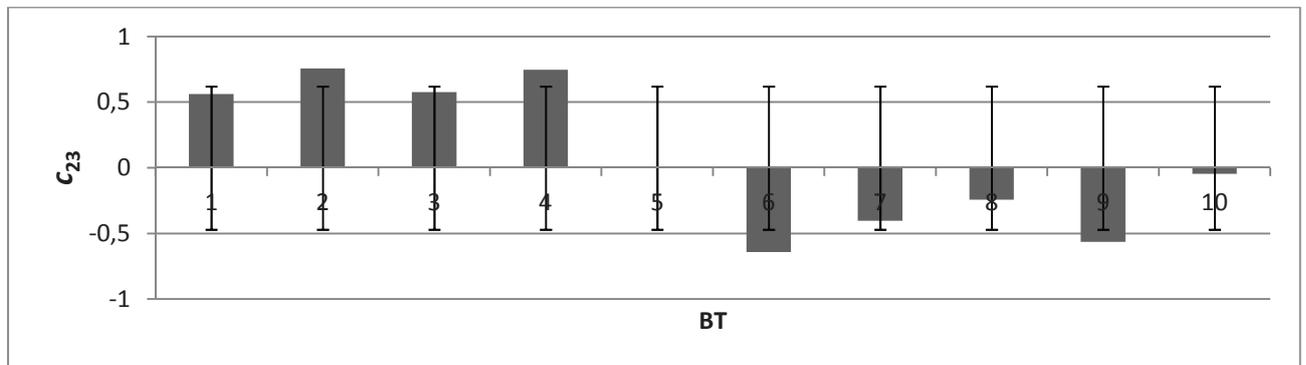
A través de los valores de las deformaciones obtenidas tras la operación de Hole Drilling en las inmediaciones del agujero, bajo una compresión transversal en la Cara 2 (Figura 7.19, centro) y resolviendo las ecuaciones correspondientes, se obtienen los valores de los elementos que forman la tercera columna de la matriz en cada bloque (c_{13} , c_{23} y c_{33}).

Tabla 7.9

Valores de las constantes de *compliance* de la tercera columna de la matriz en los ensayos de compresión transversal a las fibras (Cara 2)

| | BT1 | BT2 | BT3 | BT4 | BT5 | BT6 | BT7 | BT8 | BT9 | BT10 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| c_{13} | 0,562 | 0,756 | 0,576 | 0,745 | 0,005 | -0,641 | -0,404 | -0,242 | -0,565 | -0,045 |
| c_{23} | -0,869 | -0,847 | -0,346 | -0,056 | -1,096 | -0,788 | -2,068 | -1,188 | -1,682 | -1,356 |
| c_{33} | -2,864 | -2,795 | -0,916 | -0,974 | -3,578 | -0,538 | -2,040 | -2,977 | -4,295 | -2,608 |

BFn: B. Bloque T. Carga Transversal a las fibras n. Número del bloque ensayado



Resultados 2ª columna de la matriz

Deben conocerse los valores de las otras constantes para despejar el valor central de la matriz de compliance (c_{22}), por eso este ensayo debe realizarse en último lugar. Además, la probeta especial es extraída de la original en un segundo corte de carpintería (Figura 7.19, derecha). En esta ocasión se han obtenido el doble de valores de la constante central por haberse realizado la perforación de Hole Drilling en ambas caras (1 y 2). Se recuerda que las constantes c_{12} y c_{32} son iguales a cero por coincidir los ejes principales de la roseta con las principales direcciones elásticas del material.

Tabla 7.10

Valores de las constantes de *compliance* de la segunda columna de la matriz en los ensayos de compresión oblicua (Cara 1)

| | BO1.1 | BO1.2 | BO1.3 | BO1.4 | BO1.5 | BO1.6 | BO1.7 | BO1.8 | BO1.9 | BO1.10 |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| c_{12} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| c_{22} | 3,422 | 2,853 | 3,729 | 0,910 | 3,624 | 1,716 | 1,561 | 3,289 | 1,076 | 1,689 |
| c_{32} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

BO1.n: B. Bloque **O.** Carga Oblicua respecto a las fibras **1.n.** Cara 1. Número del bloque ensayado

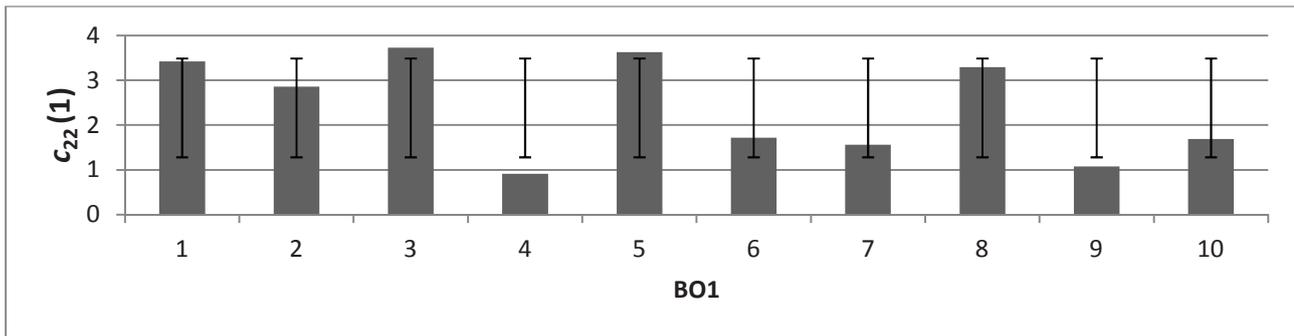
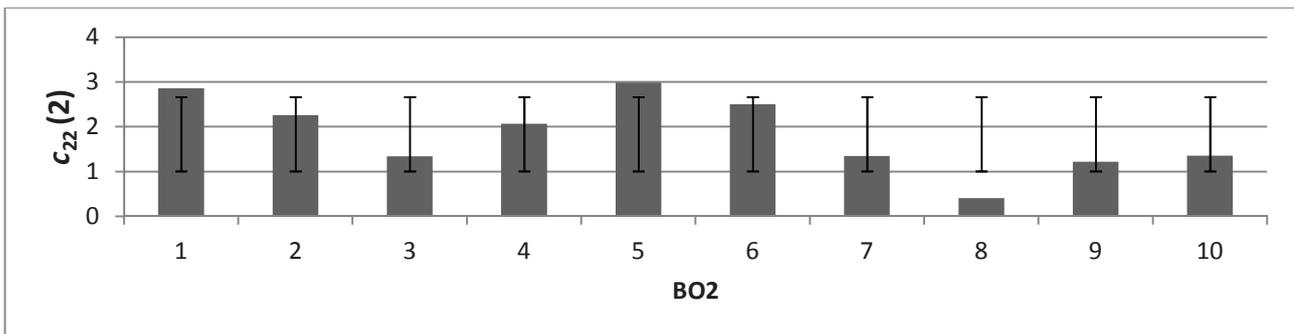


Tabla 7.11

Valores de las constantes de *compliance* de la segunda columna de la matriz en los ensayos de compresión oblicua (Cara 2)

| | BO2.1 | BO2.2 | BO2.3 | BO2.4 | BO2.5 | BO2.6 | BO2.7 | BO2.8 | BO2.9 | BO2.10 |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| c_{12} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| c_{22} | 2,856 | 2,258 | 1,339 | 2,068 | 2,984 | 2,497 | 1,343 | 0,406 | 1,217 | 1,351 |
| c_{32} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

BO2.n: B. Bloque **O.** Carga Oblicua a las fibras **2.n.** Cara 2. Número del bloque ensayado



Las tablas y gráficos anteriores representan los valores obtenidos en los ensayos de esta primera fase experimental. Las líneas con bigotes en los gráficos de barras sirven para visualizar el error por desviación estándar de cada probeta con respecto de la media. El tamaño de la muestra en las compresiones paralela a fibra y en la perpendicular ha sido 10, mientras que en la compresión oblicua ha sido de 20. En el Anexo 1, se recogen los datos de todos los ensayos de Hole Drilling realizados. La Tabla 7.12 muestra las medidas de dispersión de esos datos. Se toman los valores medios de cada constante de *compliance* para completar la matriz.

Tabla 7.12

Medidas de dispersión de los valores obtenidos

| | Media | Máx. | Min. | Rango | Varianza | Desv. Típica | Coef. Variación | E.S.M. | Int. Conf. 80% | Tamaño muestra |
|----------|--------|--------|--------|-------|----------|--------------|-----------------|--------|----------------|----------------|
| c_{11} | -0,789 | 0,101 | -2,309 | 2,410 | 0,421 | 0,649 | 82,3 | 0,205 | 0,263 | 10 |
| c_{21} | -0,419 | 0,465 | -1,422 | 1,887 | 0,244 | 0,494 | 117,8 | 0,156 | 0,200 | 10 |
| c_{31} | -0,092 | 0,764 | -0,986 | 1,750 | 5,375 | 2,318 | 98,3 | 0,733 | 0,197 | 10 |
| c_{13} | 0,075 | 0,756 | -0,641 | 1,397 | 0,267 | 0,517 | 689,3 | 0,163 | 0,209 | 10 |
| c_{23} | -1,030 | -0,056 | -2,068 | 2,012 | 0,317 | 0,563 | 54,7 | 0,178 | 0,228 | 10 |
| c_{33} | -2,359 | -0,538 | -4,295 | 3,757 | 1,354 | 1,164 | 49,3 | 0,368 | 0,472 | 10 |
| c_{22} | 2,110 | 3,729 | 0,406 | 3,323 | 0,934 | 0,966 | 45,8 | 0,216 | 0,277 | 20 |

En definitiva, el valor de la matriz que define el comportamiento elástico de elementos de pino radiata D. Don sometidos a compresión es el siguiente:

$$C_{PRcomp} = \begin{pmatrix} -0,789 & 0 & 0,075 \\ -0,419 & 2,110 & -1,030 \\ -0,092 & 0 & -2,359 \end{pmatrix}$$

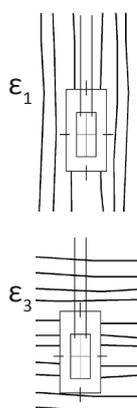


Figura 7.20

Detalle de la posición de la galga paralela a la carga introducida con respecto a la dirección de las fibras

7.1.4 Ensayos de comprobación en el laboratorio

Ocho probetas nuevas (o Bloques Nuevos, BN) han sido ensayadas posteriormente no para obtención de datos sino para la comprobación de los valores obtenidos en la campaña anterior, tanto para comprobación de los módulos elásticos principales a compresión como para la comprobación de la matriz de *compliance*.

Se ha tomado la decisión de ensayar las piezas a compresión perpendicular simulando la tensión que soporta una zapata, pieza de transición entre un poste y una viga. Las zapatas se encuentran habitualmente deformadas a causa de un punzonamiento excesivo y pueden resultar de interés en una estructura real en servicio. Las deformaciones por compresión perpendicular resultan más claras que las de compresión paralela. La banda extensométrica ϵ_3 actúa midiendo la deformación de varias fibras, mientras que la ϵ_1 , en compresión paralela, mide la deformación de pocas fibras (Figura 7.20).

Además, al comprimir perpendicularmente un bloque las fibras se alargan por efecto Poisson, dando deformaciones más claras. En compresión paralela las fibras se arrugan dando lugar a deformaciones más confusas (Figura 7.21).

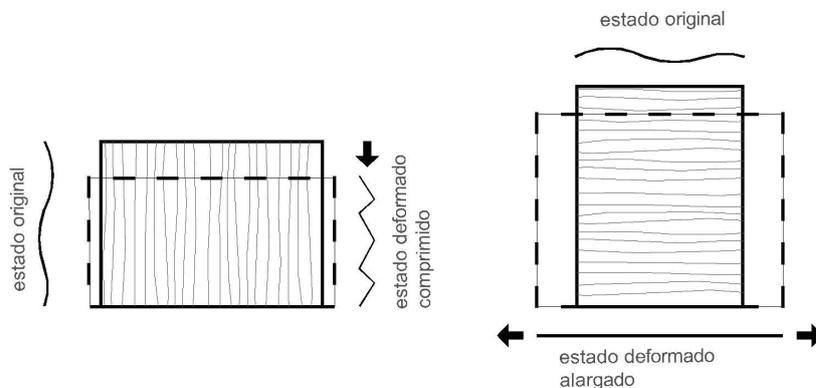


Figura 7.21

Esquema de la deformación de las fibras en función del tipo de compresión. En compresión paralela las fibras se encogen y en compresión perpendicular las fibras se alargan

Se recuerda que en el cálculo de un estado tensional de una estructura en servicio, la incógnita a resolver es el tensor de tensiones derivado de un estado de cargas desconocido, mientras que los módulos elásticos y la matriz de compliance son conocidos, habiéndose resuelto previamente en el laboratorio para la especie *pinus radiata* D. Don, objeto de estudio en esta Tesis. Aplicando la técnica de Hole Drilling sobre el elemento analizado se obtendrán los valores de las deformaciones de relajación en el perímetro del agujero ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$). Conocido el valor de la matriz de *compliance* para elementos de pino radiata sometidos a compresión, el cálculo de la inversa es inminente y en consecuencia el cálculo de las tensiones, sencillo.

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \sigma_x \end{pmatrix} = \sqrt{E_x E_y} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{pmatrix} \quad \blacktriangleright \quad \begin{pmatrix} \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \sigma_x \end{pmatrix} = \sqrt{E_x E_y} \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{pmatrix}$$

Se ha procedido por tanto al cálculo de dicha matriz inversa para poder operar en los ensayos de comprobación:

$$C_{PRcomp} = \begin{pmatrix} -0,789 & 0 & 0,075 \\ -0,419 & 2,110 & -1,030 \\ -0,092 & 0 & -2,359 \end{pmatrix} \quad \blacktriangleright \quad C^{-1}_{PRcomp} = \begin{pmatrix} -1,263 & 0 & -0,040 \\ -0,227 & 0,474 & -0,214 \\ 0,049 & 0 & -0,422 \end{pmatrix}$$

Las ocho probetas nuevas se someten a una carga conocida en el laboratorio, controlada mediante el grupo compresor. Se realiza la perforación de la misma manera que se ha explicado en los capítulos anteriores y los valores de deformación se incluyen en la ecuación de Hole Drilling junto con la matriz inversa de *compliance* y la raíz cuadrada del producto de los módulos elásticos principales. Los datos de los ensayos de comprobación a compresión

perpendicular se recogen en el Anexo 1. En la Tabla 7.13 se comparan las tensiones reales existentes en las piezas de madera ($\sigma_{m\acute{a}q}$), derivadas directamente con la carga conocida aplicada, con las tensiones calculadas mediante la formulaci3n de Hole Drilling (σ_{HD}).

Tabla 7.13

Comparaci3n entre las tensiones aplicadas mediante el control de la m\acute{a}quina de compresi3n y las tensiones obtenidas mediante la formulaci3n de Hole Drilling

| | BN1 | BN2 | BN3 | BN4 | BN5 | BN6 | BN7 | BN8 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\sigma_{m\acute{a}q}$ (MPa) | -4,64 | -4,37 | -4,35 | -4,31 | -4,29 | -4,43 | -3,51 | -3,95 |
| σ_{HD} (MPa) | -5,15 | -3,75 | -4,35 | -4,77 | -2,85 | -4,30 | -2,55 | -3,03 |
| Diferencia (MPa) | 0,51 | 0,62 | 0 | 0,46 | 1,44 | 0,13 | 0,96 | 0,92 |
| Error % | 11 | 14 | 0 | 11 | 34 | 3 | 27 | 23 |

BNn: B. Bloque N. Nuevo, de comprobaci3n n. N\acute{u}mero del bloque ensayado

NOTA: Tanto las Diferencias como los Errores se reflejan en sus valores absolutos

7.1.5 Limitaciones de los ensayos de compresi3n

Se han advertido algunas limitaciones a la hora de realizar ensayos de compresi3n. Lejos de los planteamientos te3ricos, tras la realizaci3n de los ensayos se han observado las siguientes dificultades:

Probetas imperfectas

Las probetas obtenidas en la carpinter\acute{a} no son paralelep\acute{i}pedos matem\acute{a}ticamente perfectos. Aunque a simple vista no se pueda apreciar, los planos que forman las probetas no son perfectamente paralelos ni perpendiculares entre s\acute{i}.

Adem\acute{a}s, cada probeta es diferente debido a la heterogeneidad de la madera, cada probeta proviene de un \xe1rbol o de distintas trozas de un mismo \xe1rbol, pudiendo tener influencia en la tensi3n interna natural, al margen de la estructural. La desviaci3n de la fibra, sobre todo alrededor de los nudos, influye en cuanto a los conceptos de “paralelo y perpendicular a la fibra”.

Estas imperfecciones, a veces imperceptibles a simple vista, pueden influenciar en los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que son relacionadas con las deformaciones, medidas en escala de micras por metro ($\mu\text{m}/\text{m}$).

Efecto barril en la probeta

Durante la realizaci3n de los primeros ensayos en la campaa experimental de Donostia-San Sebasti\acute{a}n se recogieron algunos gr\acute{a}ficos de deformaci3n incoherentes durante la puesta en carga. Se advirtieron, por ejemplo,

deformaciones verticales en compresión axial acusando tracción en probetas que evidentemente estaban siendo comprimidas. La explicación puede encontrarse en el efecto de Poisson, que al comprimir un cuerpo éste tiende a expandirse lateralmente según las proporciones dictadas por un coeficiente propio en cada material elástico. Si esa expansión es coartada por un rozamiento, la probeta se expandirá exclusivamente en la parte central adquiriendo una forma abarrilada (Figura 7.22). Se ha observado en este caso que existe una fricción entre las mordazas de la máquina de ensayo y las superficies de contacto de la probeta promoviendo este efecto.

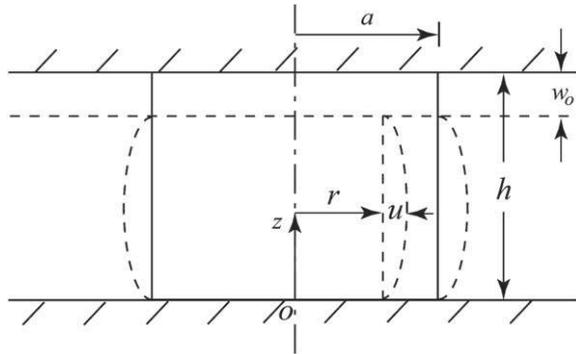


Figura 7.22
Deformación por efecto barril de una probeta sometida a compresión (Williams, Gamonpilas 2008)

Para evitar el efecto barril, se toma la rápida decisión de lubricar con vaselina y grasa de litio la superficie de contacto entre la probeta y las mordazas de compresión. De esta manera la superficie podrá expandirse libremente sin rozamiento alguno, evitando así ese efecto no deseado y poder continuar con los ensayos sin registrar deformaciones anómalas.



Figura 7.23
Productos lubricantes utilizados para evitar rozamientos entre la probeta y la máquina de compresión

Cargas excéntricas

Las imperfecciones geométricas de la probeta tienen una gran influencia en la desviación que puede surgir en el momento de aplicar las cargas. El cabezal o mordaza que ejerce presión sobre la superficie de la probeta, tiene la capacidad de rotar hasta ajustarse al contacto con la superficie. Si la probeta no es un paralelepípedo la superficie de la probeta puede quedar algo inclinada respecto al eje de la carga y, en consecuencia, la tensión ejercida puede desviarse de la dirección prevista.

Además, el contacto entre el cabezal de presión y la probeta ocasionalmente no es total si la superficie de la probeta no es completamente plana. En tal

caso, le cabezal ejerce más presión en unas zonas que en otras haciendo que la carga no sea concéntrica ni regular.

Cargas inestables

La máquina disponible en el laboratorio de la E.T.S. de Arquitectura de Donostia-San Sebastián, es un equipo compresor capaz de ejercer hasta 300 Tn de fuerza. Sin embargo, en lo que concierne a los ensayos de esta Tesis Doctoral, para el material y las dimensiones de las probetas utilizadas en los ensayos, no se superan las 10 Tn de fuerza. Es decir, se ha trabajado en los límites inferiores de esta máquina, haciendo que carga oscile y varíe mientras se intenta estabilizar en un valor concreto.

Módulos elásticos locales

Se ha medido la elasticidad de cada probeta durante el proceso de Hole Drilling, antes de realizar la perforación. Esas deformaciones han sido medidas utilizando las mismas galgas extensométricas útiles para medir las deformaciones de relajación en el perímetro del agujero. La resolución de estas galgas es de $\mu\text{m}/\text{m}$ debido a que las deformaciones por relajación del material son de esas dimensiones.

No se ha medido la elasticidad de la probeta en su conjunto, sino la elasticidad en el punto exacto donde se va a realizar el agujero posteriormente. Habitualmente la medición de los módulos elásticos se realiza mediante extensómetros de tipo LVDT, pero en este caso interesa más el comportamiento elástico del punto en el que se va a realizar en ensayo de Hole Drilling y se aprovecha a registrar las deformaciones registradas en las puestas en carga para este cometido.

7.2 Fase II: Flexión

La segunda fase del trabajo experimental fue llevada a cabo en el laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela de Ingenieros Agroforestales de Palencia (Figura 7.24), perteneciente a la Universidad de Valladolid, de la mano del Dr. Luis Acuña Rello.

Los ensayos en este laboratorio sirven para estudiar y definir el comportamiento elástico-mecánico de las probetas de *pinus radiata* D. Don sometidas a flexión. Una vez se haya comprendido y definido la respuesta en el laboratorio, se podrá aplicar la técnica en una estructura real en servicio bajo el mismo tipo de sollicitación y mismo tipo de madera, en este caso, una viga o una vigueta de pino radiata. El nuevo objetivo de esta fase es identificar los módulos elásticos en la cara de máxima tracción y las constantes de compliance para este tipo de sollicitación.



Figura 7.24

Vista general del laboratorio de tecnología de la madera de la E.T.S. de Ingenieros Agroforestales de Palencia (Universidad de Valladolid)

Antes de pasar al desarrollo propiamente dicho de los ensayos se van a aclarar algunos conceptos, que diferencian esta segunda fase de la primera, la de compresión. Para empezar, se denomina flexión a la deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. Las barras, vigas y elementos claramente longitudinales son los que sufren este tipo de deformación al aplicar fuerzas perpendiculares al eje (Figura 7.25). El esfuerzo que provoca la flexión es denominado Momento Flector.

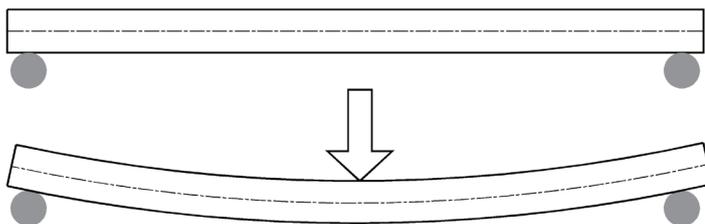


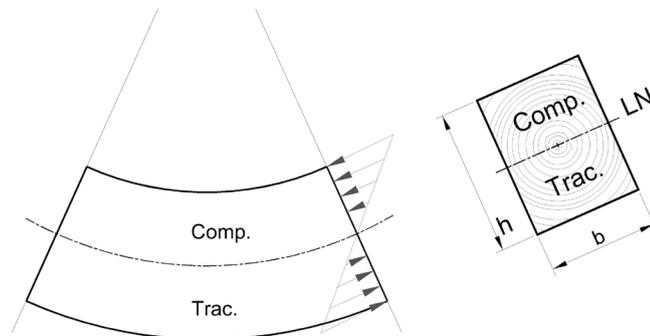
Figura 7.25

Deformación de una viga sometida a flexión

Como se observa en la Figura 7.26, en flexión, las fibras de la parte superior de la viga se comprimen mientras que las fibras inferiores se alargan o traccionan. Esta separación de fenómenos se produce en la Línea o Fibra Neutra. Se llama así al plano en el que las fibras ni se encogen ni se alargan. La ubicación exacta de esa línea que separa la tracción de la compresión, se puede determinar en función de la geometría de la sección transversal de la viga; si ésta es doblemente simétrica, como ocurre en vigas con secciones rectangulares, la Línea Neutra separará la sección en dos partes iguales. Las secciones transversales de la viga permanecen planas y normales al eje longitudinal de la viga. Ese eje es el que se deforma en función del momento flector ejercido por la carga. En el caso de una viga de sección transversal rectangular las fibras que están por encima de la Fibra Neutra se acortan numéricamente lo mismo que se alargan las que están por debajo.

Figura 7.26

Esquema de deformación de las fibras por encima y por debajo de la Línea Neutra (LN)

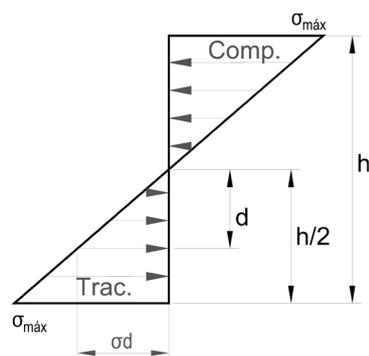


Esas deformaciones de compresión y de tracción tienen asociadas unas tensiones normales actuando sobre la sección transversal, cuyos valores varían linealmente en función de la distancia a la Línea Neutra, siempre que se trate de un material linealmente elástico. La madera puede considerarse un material linealmente elástico, como se explicó en un capítulo anterior, antes de alcanzar la fase plástica.

Los valores de esa tensión normal tienen numéricamente el mismo valor si se encuentran a la misma distancia de la Línea Neutra, sea por encima y por debajo. Esos valores serán de signos matemáticos opuestos (Figura 7.27). En la cara superior de la viga la tensión será máxima a compresión, mientras que la tensión en la cara inferior será máxima pero a tracción.

Figura 7.27

Gráfica de tensiones en función de la disposición con respecto a la Fibra Neutra, medido en el canto de la sección transversal



La tensión normal a la sección transversal ejercida en el laboratorio a través de la carga en máquina, la que ha de compararse con la calculada mediante la formulación de Hole Drilling para materiales ortotrópicos, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_d = \frac{M \cdot d}{I}$$

Siendo:

M Momento Flector en el punto analizado

d Distancia existente entre la Fibra Neutra y el punto analizado

I Momento de Inercia de la sección de la viga o pieza objeto de estudio, que para una sección rectangular es:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}, \text{ siendo } b \text{ el ancho y } h \text{ el canto de la sección transversal}$$

A menudo, sobre todo si se trata de una sección transversal simétrica respecto al eje de gravedad, como en este caso, también resulta habitual la siguiente notación para el cálculo de la tensión. En estos casos las tensiones en las fibras extremas a tracción y a compresión son iguales y se tiene el cuental el Módulo de Resistencia de la sección transversal:

$$\sigma_{ext} = \frac{M}{W}$$

Siendo:

M Momento Flector en las fibras extremas (en este caso en el extremo a tracción)

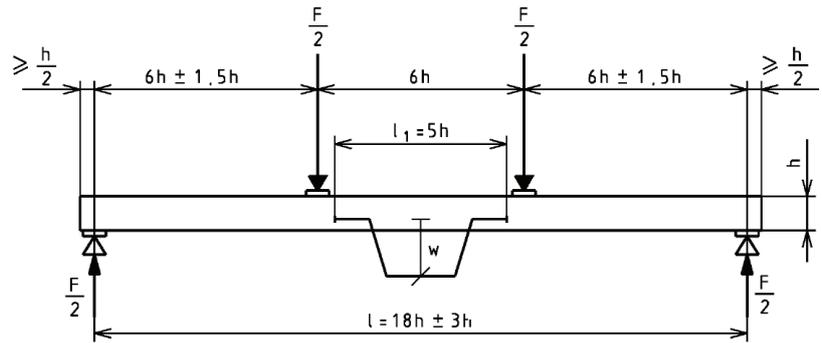
W Módulo de Resistencia de la sección transversal, que para una sección rectangular es:

$$W = \frac{I}{d} = \frac{b \cdot h^3 / 12}{h/2} = \frac{b \cdot h^2}{6}, \text{ siendo } b \text{ el ancho y } h \text{ el canto de la sección}$$

La norma de referencia que establece como deben realizarse los ensayos a flexión es la UNE-EN 408. Según esta norma en el dispositivo de ensayo general (según Figura 7.28) debe haber una separación mínima entre apoyos de 18 veces el canto de la sección y la longitud de la pieza debería ser al menos, 19 veces esta medida. La carga se aplica en dos puntos, separados entre sí 6 veces el canto. Es decir, la viga debe quedar dividida en tercios de longitud $6h$.

Figura 7.28

Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad en flexión según la Norma UNE-EN 408



El diagrama de carga no es triangular en este tipo de ensayos, a diferencia que en las normas americanas. Esta disposición tiene la ventaja de poder ensayar con esfuerzos de flexión constantes en la totalidad del tercio central de la viga. A este caso se le denomina Flexión Pura y es de gran interés porque cuando el Momento Flector es constante y el esfuerzo cortante es igual a cero, de modo que solamente existe en el centro de la viga una tensión normal (Figura 7.29).

En esta fase experimental, se plantean los ensayos según establece la Norma UNE-EN 408 para la realización de los ensayos de módulos de elasticidad. La carga será aplicada en dos puntos simétricos, dividiendo la viga en tres partes iguales. La zona de la viga entre las cargas, es decir el tercio central, estará sometida a flexión pura. Esta condición supone algunas ventajas a la hora de ejecutar el ensayo de Hole Drilling. Por un lado, tener la garantía de que la perforación se realiza bajo un momento flector constante y máximo ($M = Q \cdot a$) y sin la influencia de esfuerzos cortantes

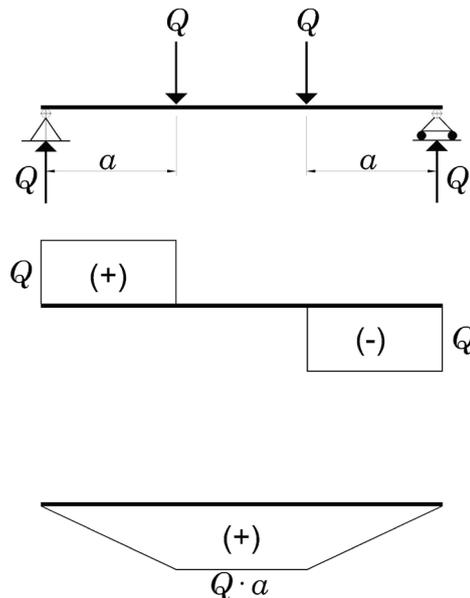


Figura 7.29

Esquema de esfuerzos cortantes y momentos flectores en una viga a flexión en la que actúan dos cargas puntuales

en esa parte de la viga (Figura 7.29). Por otro lado, no es necesario ser tan preciso a la hora de elegir el lugar exacto donde se va a realizar como si el Momento Flector máximo se diera solamente en un punto, como en el caso de una carga uniformemente distribuida con esquema triangular de momentos flectores.

Por analogía a los ensayos de compresión de la primera fase, la primera intuición fue realizar los ensayos en la cara de compresión máxima. Sin embargo esta idea fue rechazada con rapidez. En una estructura real, normalmente la cara sometida a compresión máxima, queda embebida en el forjado y el acceso resulta imposible. Por el contrario, la cara de máxima tracción, la "panza" de la viga flexionada, queda descolgada del forjado y normalmente a la vista, de modo que la realización del agujero es posible en este plano (Figura 7.30).



Figura 7.30

Ejemplo de dos forjados de madera donde las caras vigas de las vigas corresponden con las de máxima tracción

Otra razón para elegir la cara inferior de la viga, como se ha mencionado ya, fue que las deformaciones son más “claras y limpias” en las fibras que están en la parte comprimida. Microscópicamente, cada fibra traccionada se estira en comparación a su posición relajada dando lugar a unas deformaciones unitarias fiables. Mientras, las fibras comprimidas, por encima de la Línea Neutra, se arrugan dando lugar a deformaciones menos precisas (Figura 7.31).

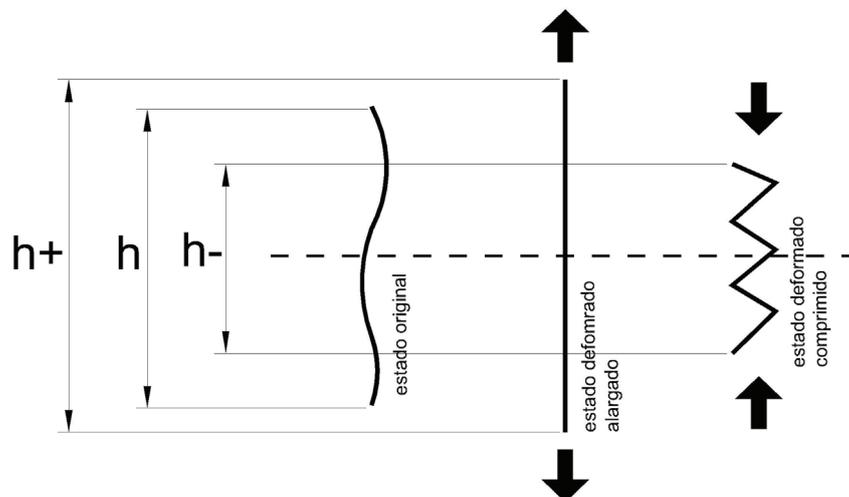


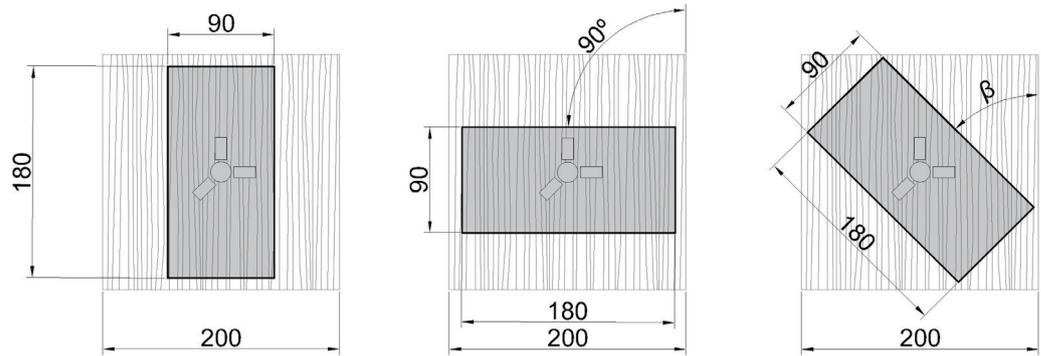
Figura 7.31

Representación de los efectos de deformación en una fibra. A la izquierda una fibra sin tensión externa, en el centro una fibra sometida a tracción (estirada) y a la derecha una fibra sometida a compresión (“arrugada”)

7.2.1 Preparación del ensayo

Una vez se ha establecido el tipo de sollicitación en el que se va a centrar esta parte de la investigación, se plantean tres tipos de ensayos para poder completar la matriz de *compliance*. En este caso los datos obtenidos serán de aplicación en elementos estructurales de *pinus radiata* D. Don sometidos a flexión en la cara de tracción máxima o en “la panza”. El sistema de referencia en estos ensayos corresponde con el acordado en un capítulo anterior, donde el eje Y del sistema de referencia corresponde a la dirección de las fibras y el eje X con el perpendicular a las fibras.

Figura 7.32
 Los tres tipos de probetas
 cortados a partir de
 una viga estructural.
 De izquierda a derecha, axial,
 perpendicular y oblicua.



Flexo-tracción axial

Se aplican las cargas de forma que la tensión normal ejercida sobre la sección transversal sea paralela a las fibras de madera (σ_y). Se aprovechará la puesta en carga del ensayo para calcular el módulo de Young a flexo-tracción en esta dirección (E_y), mediante la pendiente de tensión-deformación en diferentes estados de la carga. Las deformaciones son recogidas por la banda extensométrica ϵ_1 , paralela a las fibras.

El ensayo se realizará sobre una probeta cuya dirección longitudinal coincida con la dirección de las fibras de la madera (Figura 7.32, izquierda).

Flexo-tracción perpendicular

En este caso las cargas deben aplicarse de forma que la tensión ejercida sobre la sección transversal sea perpendicular a la dirección de las fibras de la madera y pueda denominarse σ_x . En la puesta en carga en este tipo de ensayos se detendrá la máquina en diferentes estados de carga para registrar las deformaciones captadas por la banda ϵ_3 y calcular el módulo elástico perpendicular a flexión, E_x .

El ensayo se realizará sobre una probeta cuya dirección longitudinal sea perpendicular a la dirección de las fibras de la madera (Figura 7.32, centro).

Flexo-tracción oblicua

En un tercer ensayo las cargas serán aplicadas de modo que la tensión ejercida sobre la sección transversal de la probeta forme un ángulo intermedio entre 0° y 90° con la dirección de las fibras de la madera (Figura 7.32, derecha). En este caso no se detendrá la máquina en el proceso de carga hasta llegar a la carga deseada, solamente se realizará el ensayo de Hole Drilling una vez se haya alcanzado la tensión deseada para realizar la operación del taladro.

El objetivo es resolver los valores de las constantes elásticas que componen la matriz de *compliance*, que define el material y el tipo de sollicitación. El equipo de flexión disponible en el laboratorio de Palencia, es una máquina multiensayo con distintos cabezales que permite distribuir la carga en dos puntos, pero que

ejerce fuerza en una sola dirección (vertical). Análogamente a lo experimentado en la Fase I de compresión, se diseñan tres tipos de probeta para enfrentarse a los tres tipos de flexión planteados (Figura 7.32).

El tamaño y el diseño de las probetas se ven limitados por la sección transversal de la viga estructural de la que provienen, cuya de sección cuadrada tiene 200 mm de lado. La sección transversal de cualquier viga estructural, a su vez, está limitada por el tamaño del tronco del cual se extraiga.

Resulta complicado, con estas limitaciones en las dimensiones de las probetas, ajustarse a las dimensiones que recomienda la Norma UNE-EN 408 para los ensayos de determinación del módulo de elasticidad a flexión. Pero sí se sigue la Norma en lo que se refiere a la aplicación de dos cargas puntuales, dividiendo la viga (en este caso “taco”) en tercios, ejerciendo así una flexión pura. El canto resultante de las relaciones dimensionales según la Norma sería incapaz de soportar la sollicitación y debe aumentarse para el caso que acomete esta fase.

En esta ocasión, a diferencia que en los ensayos de compresión, las tres probetas responden a las mismas dimensiones y son obtenidas a la vez en la carpintería (Tabla 7.14). En todos los casos, se mantiene un ancho $b > 70$ mm para que pueda clasificarse como MEG.

Tabla 7.14

Dimensiones de las probetas según el tipo de ensayo a flexión

| | b (mm) | h (mm) | l (mm) |
|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Flexo-tracción axial | 90 | 50 | 180 |
| Flexo-tracción perpendicular | 90 | 50 | 180 |
| Flexo-tracción oblicua | 90 | 50 | 180 |

La Figura 7.33 representa la extracción teórica de cada una de las probetas a partir de un taco de 200 mm x 200 mm x 200 mm, sus dimensiones y la posición relativa de la roseta en cada tipo de ensayo. La ubicación de cada galga extensométrica a la hora de componer la roseta es análoga a la de los ensayos de compresión. En la dirección de las fibras y se ubica la banda extensométrica encargada de medir la deformación ϵ_1 . En la perpendicular a las fibras, se ubica la banda extensométrica ϵ_3 y en el bisector, formando un ángulo de 225° con el eje X (0°), se ubica la banda que recoge la deformación ϵ_2 .

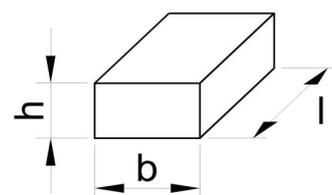
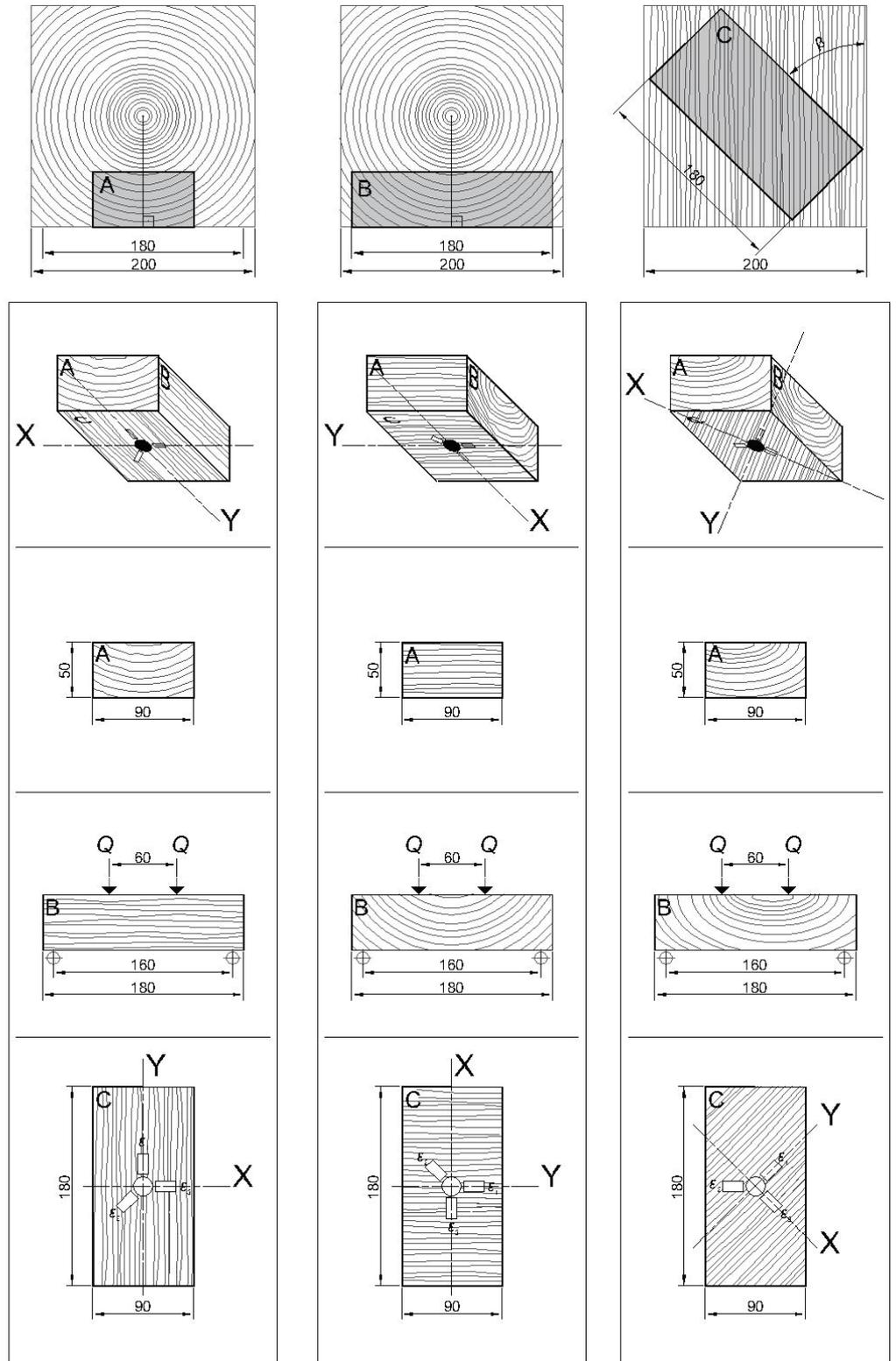


Figura 7.33

Obtención de las diferentes probetas, dimensiones y posición relativa de las fibras de la madera en cada uno de ensayos planteados



La Figura 7.34, por su parte, muestra un ejemplo real de cada tipo de probeta. Del mismo modo que se ha explicado en la parte dedicada a los ensayos de compresión, de cada probeta se obtendrá diferente información: el Hole Drilling realizado en la probeta axial servirá para completar los valores de las constantes elásticas correspondientes a la primera columna de la matriz de *compliance*, de la probeta perpendicular se extraerán los valores de los elementos que componen la tercera columna y de la probeta con las fibras oblicuas con respecto a la dirección longitudinal, se obtendrá el valor del elemento central de la matriz c_{22} . En esta ocasión el margen para desplazar la roseta es menor que en las probetas a compresión por la limitación dimensional de las probetas para estos ensayos, además de que no puede salirse del tercio central. Debe prestarse especial atención a la extracción de las probetas en la carpintería, tratando de evitar nudos y fendas en la parte central de las probetas.

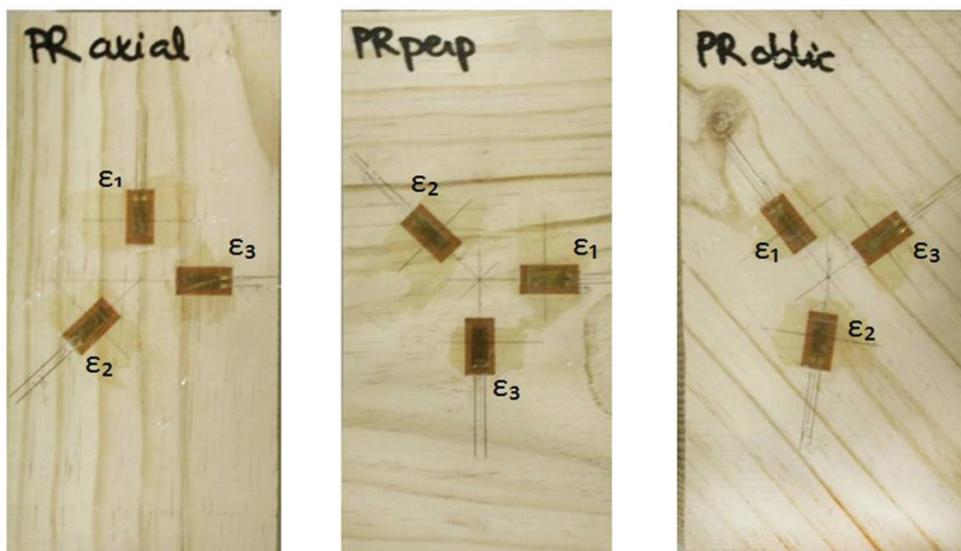


Figura 7.34

Ejemplos reales de los tres tipos de probetas con las bandas extensométricas colocadas en sus posiciones según la roseta y la dirección de las fibras. De izquierda a derecha axial, perpendicular y oblicuo.

7.2.2 Resultados de los módulos elásticos

Tanto en la probeta axial como en la perpendicular se aprovechan las puestas en carga antes de realizar el agujero de taladro para registrar las deformaciones elásticas en cada momento. Las bandas extensométricas adheridas en sus posiciones posibilitan la visualización de las deformaciones que van tomando en los diferentes estados de carga y dibujar la gráfica tensión-deformación (Figura 7.35).

La operación de Hole Drilling debe realizarse en la fase elástica del material, habitual en las estructuras ya que rara vez se pasa a la fase plástica. A efectos de cálculo, por tanto, se considera que la madera en un material linealmente elástico en el que se puede aplicar la Ley de Hooke.

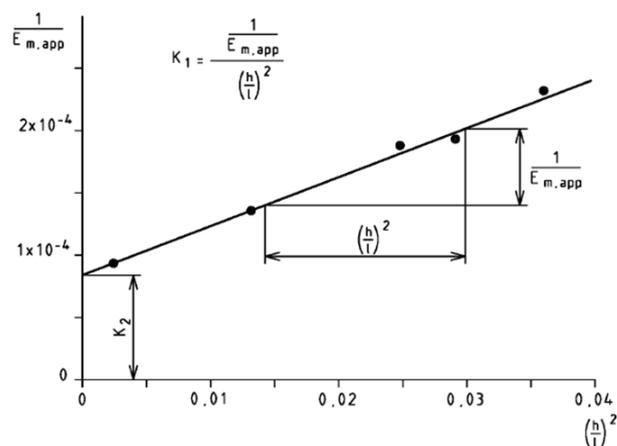


Figura 7.35

Gráfica tensión-deformación para el cálculo del módulo de elasticidad, según la Norma UNE-EN 408

Paralelo a las fibras, E_y

Durante la puesta en carga de la probeta axial se registran las deformaciones elásticas a través de las galgas extensométricas. Para medir el módulo elástico E_y basta con registrar y anotar las deformaciones relativas a Galga 1 (*Gage 1*), paralela a la dirección de las fibras de la madera.

El software utilizado en el proceso experimental representa las deformaciones a tiempo real según se muestra en la Figura 7.36. En este caso se han representado los valores relativos a las deformaciones registradas por las tres bandas, pero la que interesa para el cálculo del módulo elástico paralelo es la deformación ϵ_1 . En el eje de abscisas se representa el tiempo de duración del ensayo (min) y en el de ordenadas las deformaciones ($\mu\text{m}/\text{m}$) en cada estado de la carga.

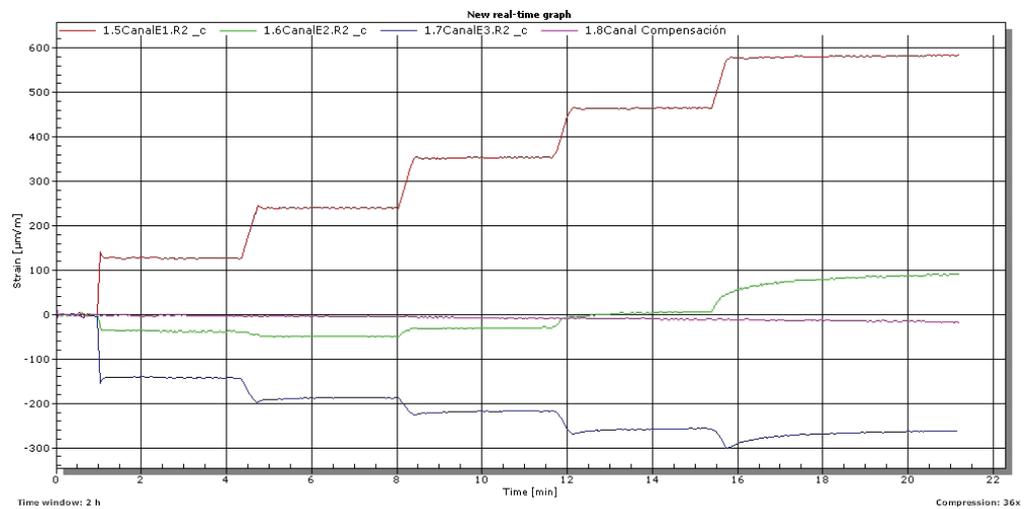


Figura 7.36

Ejemplo de puesta en carga del Probeta Axial 1 sometida a flexión mediante acción de dos cargas puntuales (la línea roja es la que indica la deformación en la Galga 1)

Esta gráfica de las deformaciones recogidas por las bandas respecto del tiempo de ensayo, se traduce en la siguiente Tabla 7.15 donde se incluyen también los valores tensión correspondiente a cada valor de la carga. Las cargas sirven también para calcular el momento flector y la tensión normal a la sección transversal, según el esquema matemático pertinente.

En las tablas siguientes se indican los valores de los módulos elásticos según los diferentes estados de cargas y las deformaciones recogidas en cada paso. En la máquina multiensayo disponible en el laboratorio de Palencia, el ciclo de cargas puede ser programado con anterioridad de modo que los saltos entre carga y carga son perfectamente iguales. Este factor ayuda a que el coeficiente de determinación se ajusta todavía mejor.

Tabla 7.15

Datos necesarios para el cálculo del módulo elástico E_y (Ejemplo Probeta Axial 1)

| PA1, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,22 | 2,43 | 3,65 | 4,87 | 6,08 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m}/\text{m}$) | 128 | 240 | 352 | 464 | 583 |
| E_y (MPa) | 10724 | | | | |

Finalmente, los datos tabulados son de nuevo representados en una gráfica nueva (Figura 7.35), en la que la pendiente entre la tensión σ_y y la deformación ϵ_1 es la que da el valor de la propiedad elástica E_y .

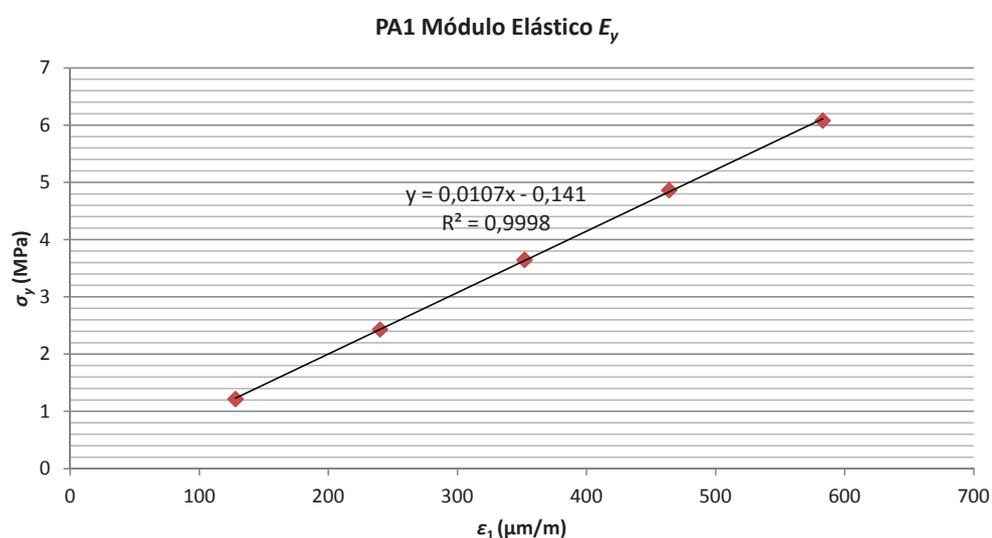


Figura 7.37

Gráfica correspondiente a la tensión-deformación de cada punto en unas de las probetas cogida como ejemplo (Probeta Axial 1)

Los cinco puntos alineados forman a una recta que responde a una ecuación ($y = bx + a$), siendo b la pendiente y por tanto el valor del módulo elástico. En el caso de la Probeta Axial 1, la recta se ajusta a la ecuación $y = 0,0107x + 0,141$. La pendiente de la recta representa el valor del módulo elástico, que para ser ajustado a la magnitud MPa debe ser multiplicado por 10^6 , es decir $E_y = 10724$ MPa. En este caso el coeficiente de determinación es $R^2 = 0,9998$, indicando que los valores obtenidos en el proceso de carga se ajustan a la recta. En el Anexo 2 pueden verse los datos tabulados y gráficos del resto de los bloques ensayados.

La Tabla 7.16 y la Figura 7.38 recogen los resultados de los Módulos Elásticos E_y en cada probeta ensayada y la Tabla 7.17 sirve como resumen del estudio estadístico de los valores obtenidos en la totalidad de los ensayos de flexión en las probetas axiales.

Tabla 7.16

Resultados de las diez probetas axiales ensayadas a flexión para la obtención del Módulo Elástico E_y

| | PA1 | PA2 | PA3 | PA4 | PA5 | PA6 | PA7 | PA8 | PA9 | PA10 |
|----------------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| E_y (MPa) | 10724 | 5660 | 6615 | 8391 | 6854 | 9846 | 11587 | 5844 | 9870 | 5930 |

Figura 7.38

Gráfico de barras de los resultados de los módulos elásticos de las diez probetas axiales ensayados a flexión

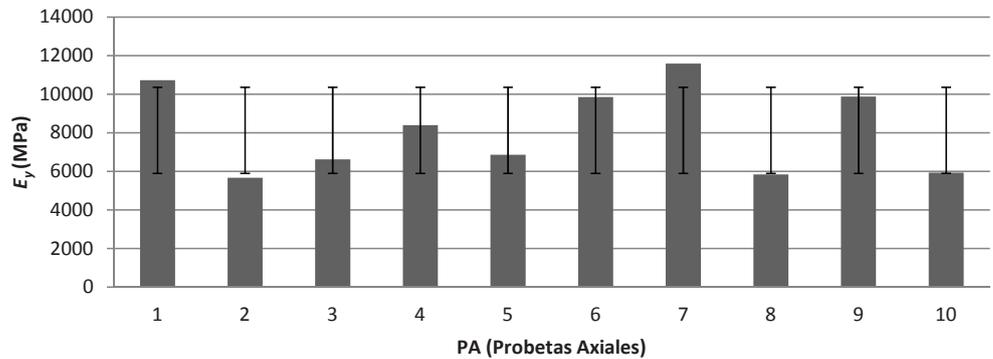


Tabla 7.17

Medidas de dispersión de los valores obtenidos

| | Media | Máx. | Min. | Rango | Varianza | Desv. Típica | Coef. Variación | E.S.M. | Tamaño muestra |
|----------------|-------|-------|------|-------|----------|--------------|-----------------|--------|----------------|
| E_y (MPa) | 8132 | 11587 | 5660 | 5927 | 448101 | 669 | 8,2 | 212 | 10 |

Perpendicular a las fibras, E_x

Es análogo el cálculo de los módulos elásticos perpendiculares a la fibra, salvo que en esta ocasión se miden las deformaciones durante la puesta en carga de las probetas perpendiculares y se registran las deformaciones captadas por la Galga 3 (*Gage 3*).

El programa informático utilizado permite observar las deformaciones que van adquiriendo las tres bandas extesométricas en cada estado diferente de carga. Las deformaciones son registradas en un gráfico a tiempo real (Figura 7.39), en el que el eje de abscisas se representa el tiempo transcurrido en el ensayo (min) y en el de ordenadas las deformaciones ($\mu\text{m}/\text{m}$).

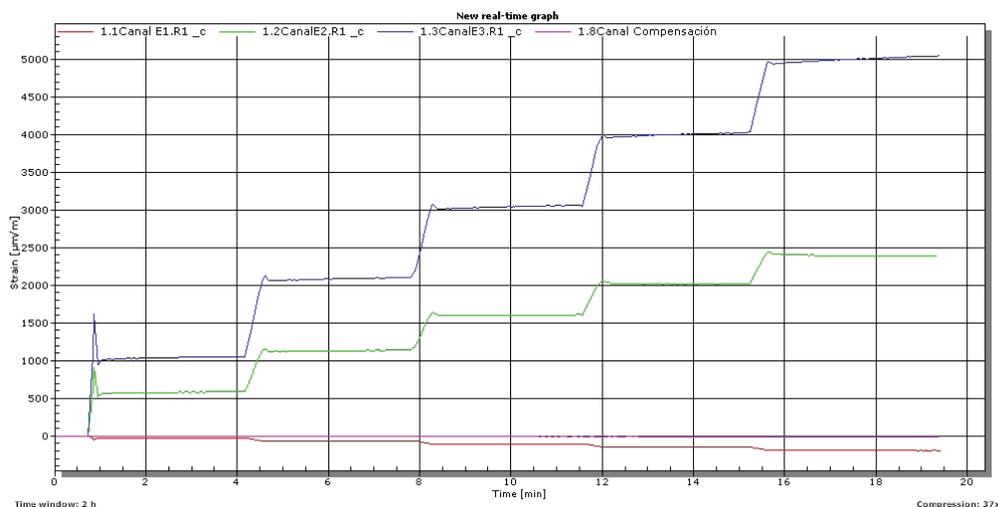


Figura 7.39

Ejemplo de puesta en carga del Probeta Perpendicular 1 sometida a flexión mediante acción de dos cargas puntuales (la línea azul es la que indica la deformación en la Galga 3)

Esta gráfica de la variación de las deformaciones en el proceso de la puesta en carga, se traduce en la siguiente Tabla 7.18, donde se incluyen también los valores de la tensión derivada de la carga aplicada mediante la máquina en los cinco puntos diferentes.

Tabla 7.18

Datos necesarios para el cálculo del módulo elástico E_x (Ejemplo Probeta Perpendicular 1)

| PP1, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Carga puntual (kN) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| σ_x (MPa) | 0,47 | 0,94 | 1,42 | 1,89 | 2,36 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m}/\text{m}$) | 1049 | 2102 | 3057 | 4020 | 5046 |
| E_x (MPa) | 476 | | | | |

Finalmente, los datos tabulados son de nuevo representados en una gráfica nueva (Figura 7.40), en la que la pendiente entre tensión σ_x y deformación ϵ_3 es la que da el valor de la propiedad elástica E_x .

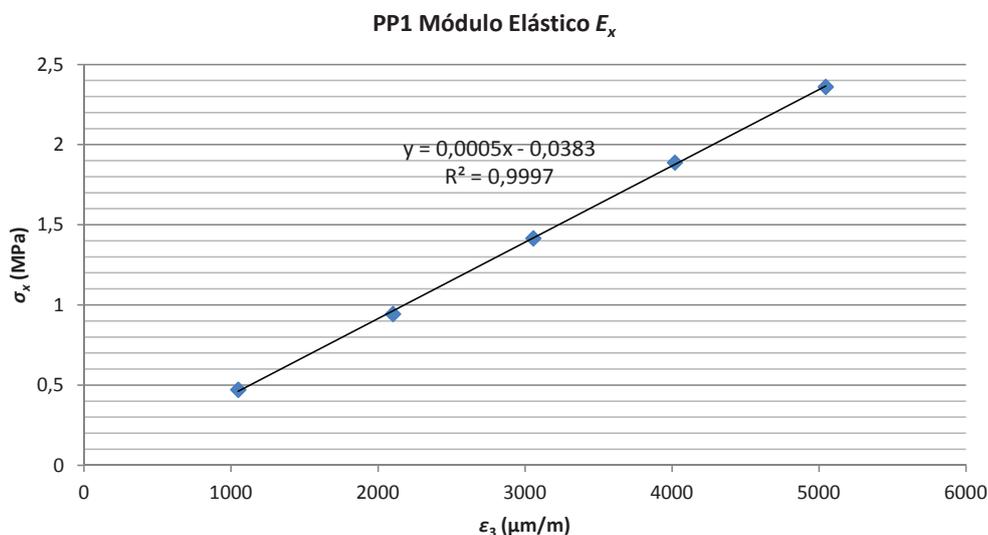


Figura 7.40

Gráfica correspondiente a la tensión-deformación de cada punto en la Probeta Perpendicular 1, cogida como ejemplo

En este caso los cinco puntos se ajustan a una recta que responde a la ecuación $y = 0,0005x - 0,0383$. La pendiente coincide con el valor del módulo elástico, ajustado a la magnitud, $E_x = 476$ MPa. $R^2 = 0,9997$ es el coeficiente de determinación, en este caso tan cercano a 1 que indica que los valores obtenidos en el proceso de carga se ajustan a la perfección a la recta. En el Anexo 2 pueden visualizarse las tablas y las gráficas correspondientes a los diez tacos ensayados.

La Tabla 7.19 y la Figura 7.41 recogen los resultados de los Módulos Elásticos E_x en cada bloque ensayado y la Tabla 7.20 sirve como resumen del estudio estadístico de los valores obtenidos en la totalidad de los ensayos de compresión perpendicular.

Tabla 7.19

Resultados de las diez probetas perpendiculares ensayadas a flexión para la obtención del Módulo Elástico E_x

| | PP1 | PP2 | PP3 | PP4 | PP5 | PP6 | PP7 | PP8 | PP9 | PP10 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|
| E_x (MPa) | 476 | 455 | 486 | 637 | 648 | 496 | 1048 | 665 | 575 | 559 |

Figura 7.41

Gráfico de barras de los resultados de los módulos elásticos de las diez probetas perpendiculares ensayadas a flexión

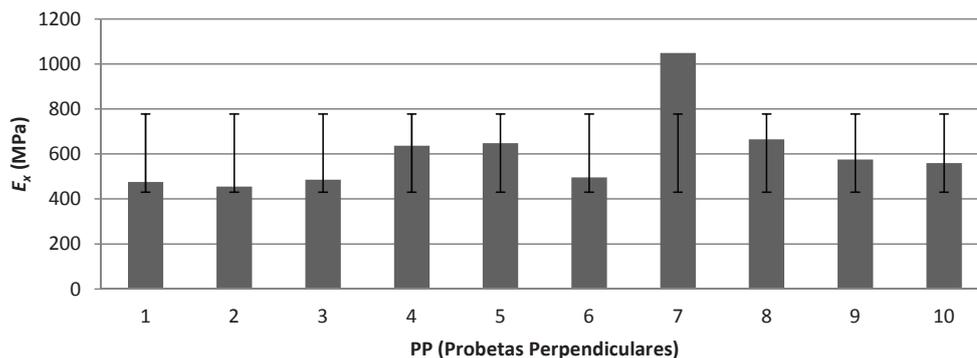


Tabla 7.20

Medidas de dispersión de los valores obtenidos

| | Media | Máx. | Min. | Rango | Varianza | Desv. Típica | Coef. Variación | E.S.M. | Tamaño muestra |
|----------------|-------|------|------|-------|----------|--------------|-----------------|--------|----------------|
| E_x (MPa) | 605 | 1048 | 455 | 593 | 2709 | 52 | 8,6 | 16,5 | 10 |

Los valores medios de los módulos de elasticidad principales obtenidos en los ensayos de flexo-tracción son los siguientes:

$$E_y = 8132 \text{ MPa}$$

$$E_x = 605 \text{ MPa}$$

7.2.3 Resultados de la matriz de *compliance*

Del mismo modo que se operó en el laboratorio de Donostia-San Sebastián a compresión, una vez que se han medido y promediado los módulos elásticos principales, se procede al ensayo de Hole Drilling. La técnica permite obtener los valores de las tensiones de relajación del material en los alrededores de la perforación y relacionarlas con constantes de *compliance* de los elementos sometidos a flexión. Para el registro de esas deformaciones se utiliza el mismo software utilizado para la medición de los módulos elástico, capaz de representar a tiempo real los valores que van tomando las deformaciones. En el eje de abscisas se representa el tiempo de realización del ensayo (min) y en el de ordenadas las deformaciones ($\mu\text{m}/\text{m}$). En esta ocasión se visualizan y registran simultáneamente los datos de las tres galgas tras la operación de Hole Drilling. En todos los casos la línea roja representa la deformación ϵ_1 , la línea azul la deformación ϵ_3 y la línea verde la deformación ϵ_2 . Las Figuras 7.42, 7.43 y 7.44 son ejemplos de las deformaciones de relajación por Hole Drilling en las gráficas recogidas en cada uno de los ensayos de flexión.

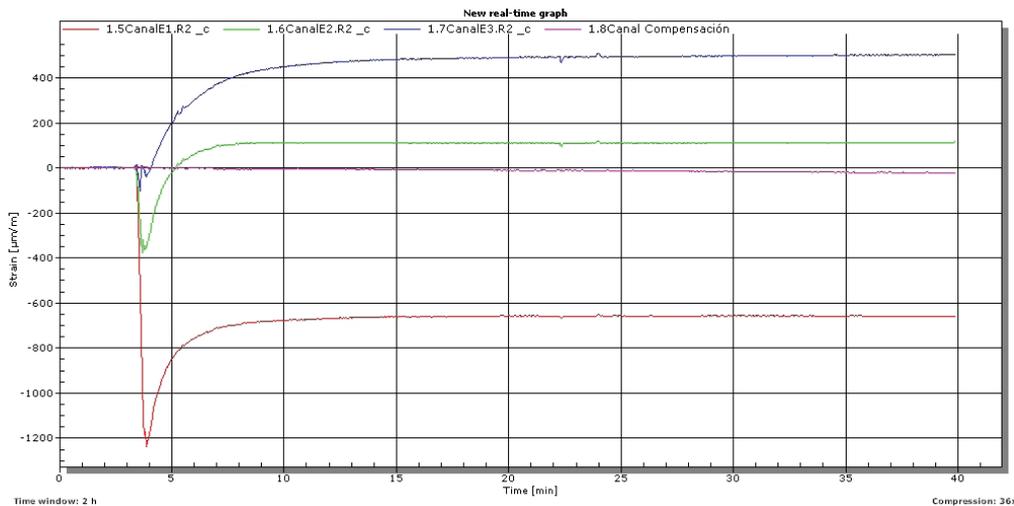


Figura 7.42
Ejemplo de las deformaciones de Hole Drilling en una probeta axial en flexión

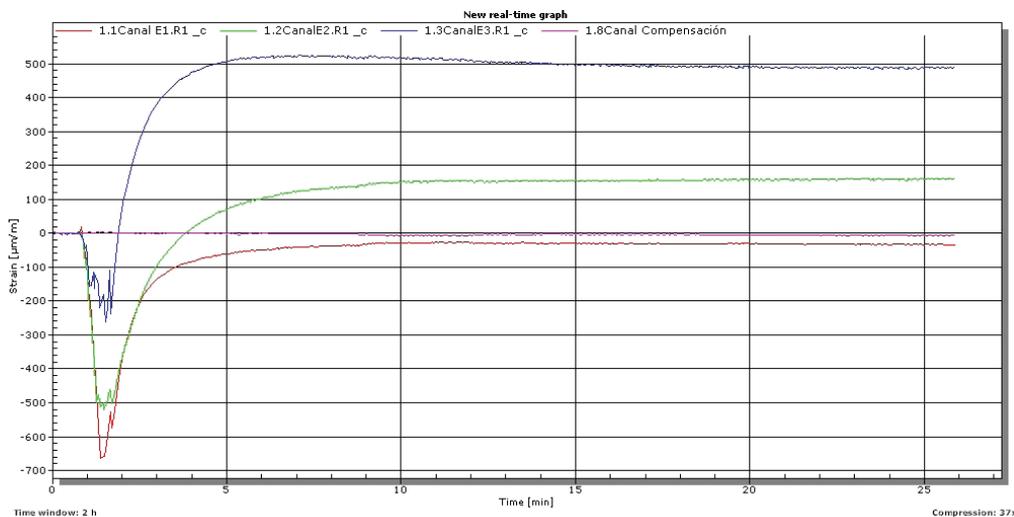


Figura 7.43
Ejemplo de las deformaciones de Hole Drilling en una probeta perpendicular en flexión

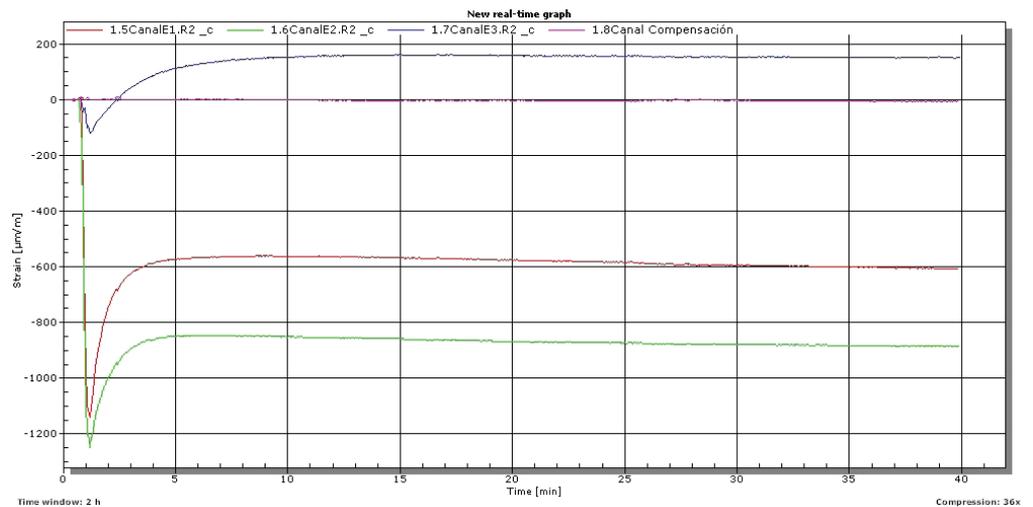


Figura 7.44

Ejemplo de las deformaciones de Hole Drilling en una probeta oblicua en flexión

La carga definitiva en la que se va a realizar la perforación de Hole Drilling, coincide con el último paso de la puesta en carga, en el caso de una probeta axial, 10 kN, y en el resto 5 kN. Cuando las deformaciones han alcanzado una estabilidad bajo dicha carga, se vuelve a iniciar una medición mediante el software auxiliar. El inicio de la gráfica representa el inicio del ensayo de Hole Drilling con todas las bandas emitiendo una deformación considerada inicial o nula ($\epsilon_i = 0$). En una estructura real, esa deformación inicial no es nula, sino que corresponde a la carga y acciones que soporta un determinado elemento. A continuación se procede a realizar la perforación, y al cabo de un tiempo las deformaciones adquieren su valor definitivo se puede dar por concluido el ensayo. Finalmente se anotan los valores de las tres deformaciones y se procede a calcular las constantes de *compliance*.

Figura 7.45

Imágenes correspondientes a los ensayos de Hole Drilling en la cara inferior de los tres tipos de probetas bajo dos cargas puntuales



Resultados 1ª columna de la matriz

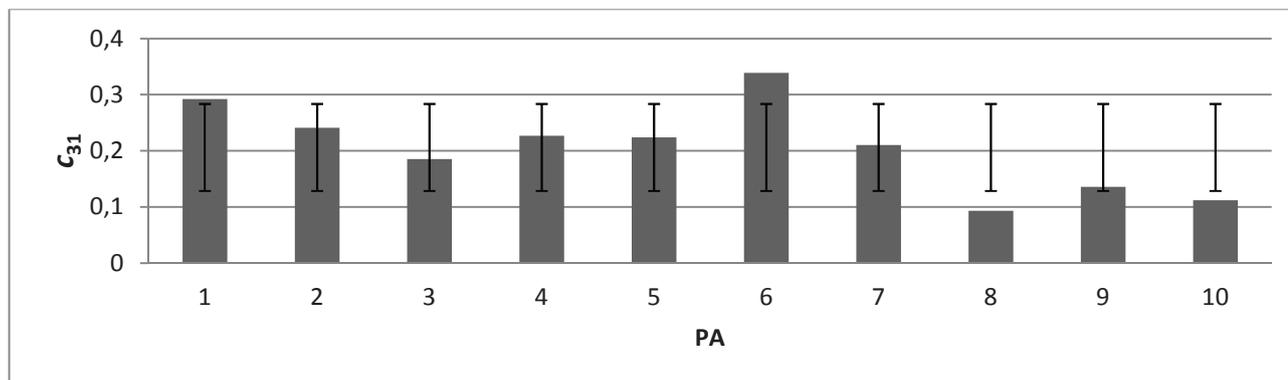
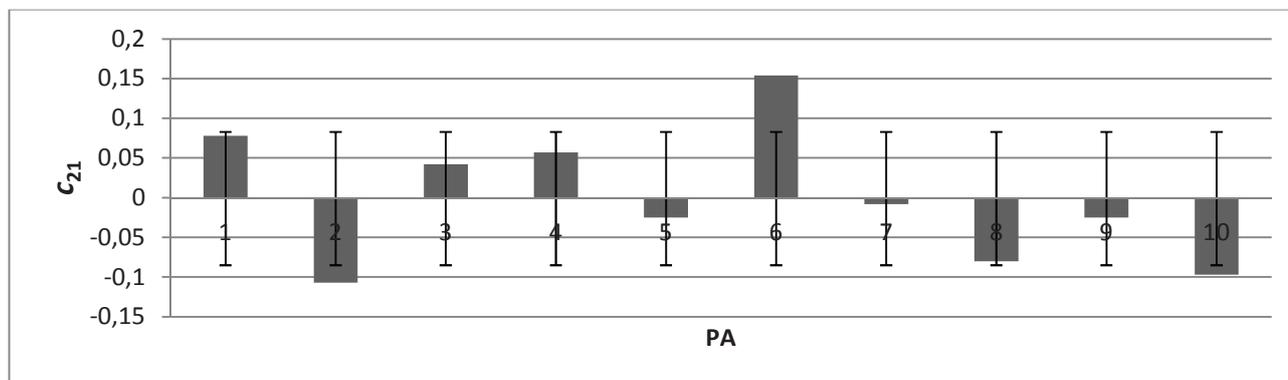
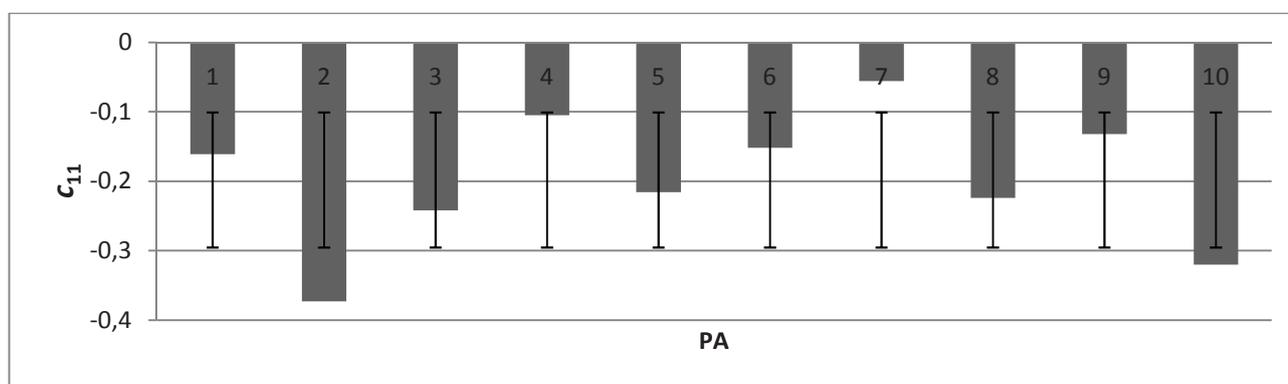
A través de los valores de las deformaciones obtenidas tras la operación de Hole Drilling en las inmediaciones del agujero, se obtienen los valores de los elementos que forman la primera columna de la matriz (c_{11} , c_{21} y c_{31}) en cada probeta axial (Figura 7.45, izquierda).

Tabla 7.21

Valores de las constantes de *compliance* de la primera columna de la matriz en los ensayos de flexión en las probetas axiales

| | PA1 | PA2 | PA3 | PA4 | PA5 | PA6 | PA7 | PA8 | PA9 | PA10 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| c_{11} | -0,161 | -0,373 | -0,242 | -0,105 | -0,216 | -0,152 | -0,056 | -0,224 | -0,132 | -0,320 |
| c_{21} | 0,078 | -0,107 | 0,042 | 0,057 | -0,025 | 0,154 | -0,008 | -0,080 | -0,025 | -0,097 |
| c_{31} | 0,292 | 0,241 | 0,185 | 0,227 | 0,224 | 0,339 | 0,210 | 0,093 | 0,136 | 0,112 |

PA n : P. Probeta A. Axial, en la dirección de las fibras n. Número de la probeta ensayada



Resultados 3ª columna de la matriz

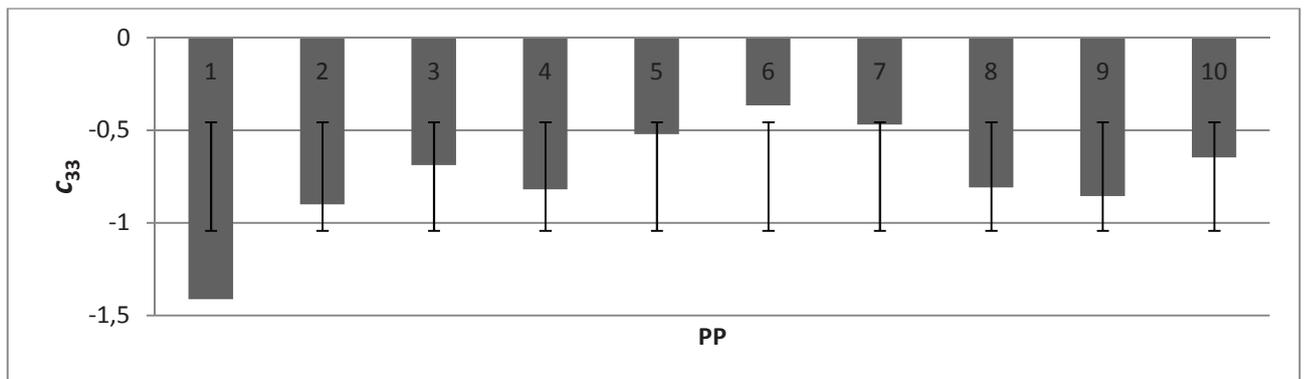
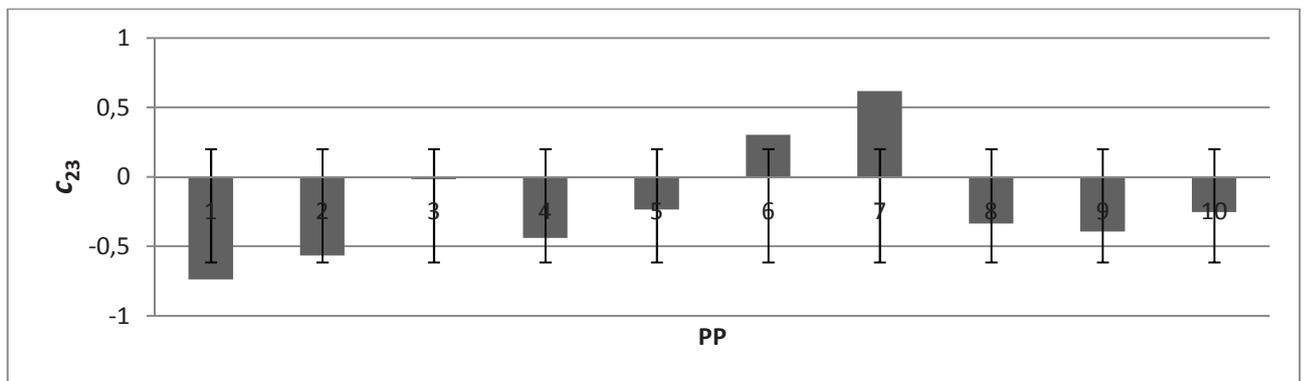
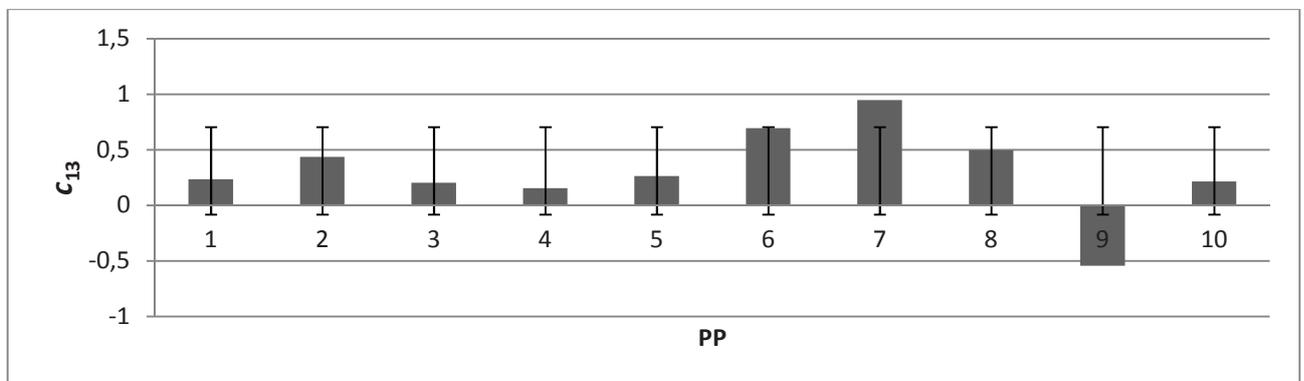
A través de los valores de las deformaciones obtenidas tras la operación de Hole Drilling en las en las probetas perpendiculares sometidos a flexión (Figura 7.45, centro), se obtienen los valores de los elementos que forman la tercera columna de la matriz (c_{13} , c_{23} y c_{33}).

Tabla 7.22

Valores de las constantes de *compliance* de la tercera columna de la matriz en los ensayos de flexión en las probetas perpendiculares

| | PP1 | PP2 | PP3 | PP4 | PP5 | PP6 | PP7 | PP8 | PP9 | PP10 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| c_{13} | 0,234 | 0,437 | 0,202 | 0,155 | 0,263 | 0,695 | 0,947 | 0,496 | -0,545 | 0,215 |
| c_{23} | -0,739 | -0,567 | -0,016 | -0,439 | -0,236 | 0,302 | 0,617 | -0,336 | -0,395 | -0,253 |
| c_{33} | -1,412 | -0,900 | -0,689 | -0,819 | -0,522 | -0,366 | -0,469 | -0,809 | -0,855 | -0,648 |

PPn: P. Probeta P. Perpendicular, en la dirección transversal de las fibras n. Número de la probeta ensayada



Resultados 2ª columna de la matriz

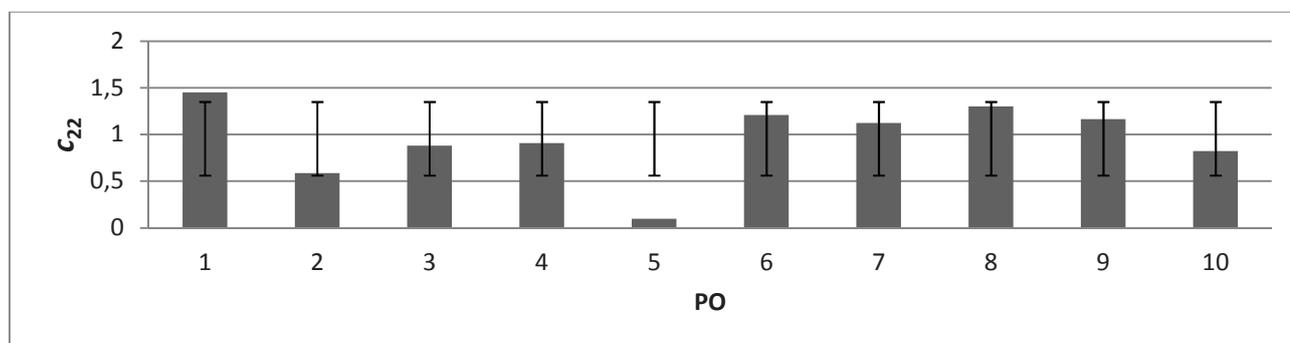
Deben conocerse los valores del resto de las constantes para despejar el valor central de la matriz de compliance (c_{22}), por eso este ensayo en la probeta oblicua (Figura 7.45, derecha) debe realizarse en último lugar. Se recuerda que las constantes c_{12} y c_{32} son iguales a cero por coincidir los ejes principales de la roseta con las principales direcciones elásticas del material.

Tabla 7.23

Valores de las constantes de *compliance* de la segunda columna de la matriz en los ensayos de flexión en las probetas con las fibras oblicuas

| | PO1 | PO2 | PO3 | PO4 | PO5 | PO6 | PO7 | PO8 | PO9 | PO10 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| c_{12} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| c_{22} | 1,451 | 0,587 | 0,882 | 0,908 | 0,099 | 1,208 | 1,123 | 1,300 | 1,165 | 0,824 |
| c_{32} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

POn: P. Probeta O. Oblicua, en una dirección oblicua de las fibras n. Número de la probeta ensayada



Las tablas y gráficos anteriores representan los valores obtenidos en los ensayos de esta segunda fase experimental. Los datos recogidos en cada uno de los ensayos pueden consultarse en el Anexo 2. Las líneas con bigotes en los gráficos de barras sirven para visualizar el error por desviación estándar de cada probeta con respecto de la media. La Tabla 7.24 muestra las medidas de dispersión de esos datos. Se toman los valores medios de cada constante de *compliance* para completar la matriz.

Tabla 7.24

Medidas de dispersión de los valores obtenidos

| | Media | Máx. | Min. | Rango | Varianza | Desv. Típica | Coef. Variación | E.S.M. | Int. Conf. 80% | Tamaño muestra |
|----------|--------|--------|--------|-------|----------|--------------|-----------------|--------|----------------|----------------|
| c_{11} | -0,198 | -0,056 | -0,373 | 0,317 | 0,012 | 0,109 | 54,8 | 0,034 | 0,043 | 10 |
| c_{21} | -0,001 | 0,154 | -0,107 | 0,261 | 0,007 | 0,086 | 8606,3 | 0,027 | 0,035 | 10 |
| c_{31} | 0,206 | 0,339 | 0,093 | 0,246 | 0,008 | 0,088 | 42,7 | 0,028 | 0,036 | 10 |
| c_{13} | 0,310 | 0,947 | -0,545 | 1,492 | 0,193 | 0,440 | 141,8 | 0,139 | 0,178 | 10 |
| c_{23} | -0,206 | 0,617 | -0,739 | 1,356 | 0,186 | 0,431 | 209,4 | 0,136 | 0,175 | 10 |
| c_{33} | -0,749 | -0,366 | -1,412 | 1,046 | 0,087 | 0,296 | 39,5 | 0,093 | 0,120 | 10 |
| c_{22} | 0,955 | 1,451 | 0,099 | 1,352 | 0,171 | 0,414 | 43,3 | 0,131 | 0,168 | 10 |

En definitiva, el valor de la matriz que define el comportamiento elástico de elementos de pino radiata D. Don sometidos a flexión es el siguiente:

$$C_{PRflex} = \begin{pmatrix} -0,198 & 0 & 0,310 \\ -0,001 & 0,955 & -0,206 \\ 0,206 & 0 & -0,749 \end{pmatrix}$$

7.2.4 Ensayos de comprobación en el laboratorio

Se han establecido los valores tanto para los módulos elásticos como para la matriz de *compliance* que corresponden al *pinus radiata* D. Don en forma de elementos estructurales sometidos a flexión, como vigas y viguetas. Se ha realizado una campaña de ensayos de comprobación en varias viguetas de 120 cm de longitud, para probar que los valores obtenidos en la primera campaña anterior, tanto de los módulos elásticos como de la matriz de *compliance* (Figura 7.46).



Figura 7.46

Algunas de las viguetas de 120 cm de longitud utilizadas para la comprobación de los datos en el laboratorio

Para el cálculo de un estado tensional de una estructura en servicio, el proceso en el inverso al realizado en la obtención de la matriz de *compliance* en el laboratorio. Es decir, la incógnita a resolver es el tensor de tensiones, derivado de un estado de cargas desconocido, mientras que los módulos elásticos y la matriz de *compliance* son conocidos habiéndose resuelto previamente en el laboratorio para una determinada especie arbórea. Aplicando la técnica de Hole Drilling sobre el elemento objeto de estudio se pueden obtener los valores de las deformaciones de relajación en el perímetro del agujero ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$). Conocido el valor de la matriz de *compliance* para elementos de pino radiata sometidos a compresión, el cálculo de la inversa es inminente y en consecuencia el cálculo de las tensiones, relativamente sencillo. En este caso, el valor de la matriz inversa es la siguiente:

$$C_{PRflex} = \begin{pmatrix} -0,198 & 0 & 0,310 \\ -0,001 & 0,955 & -0,206 \\ 0,206 & 0 & -0,749 \end{pmatrix} \quad \blacktriangleright \quad C_{PRflex}^{-1} = \begin{pmatrix} -8,870 & 0 & -3,671 \\ -0,536 & 1,047 & -0,510 \\ -2,440 & 0 & -2,345 \end{pmatrix}$$

Los datos de los ensayos de comprobación en las viguetas de 120 cm de longitud se recogen en el Anexo 2. Después de realizar las operaciones pertinentes para cada vigueta, se obtienen los siguientes valores de comprobación (Tabla 7.25).

Tabla 7.25

Comparación entre las tensiones aplicadas mediante el control de la máquina y las tensiones obtenidas mediante la formulación de Hole Drilling

| | V120-1 | V120-2 | V120-3 | V120-5 | V120-6 | V120-7 | V120-8 | V120-9 | V120-10 | V120-11 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma_{m\acute{a}q.}$ (MPa) | 30,30 | 30,00 | 30,55 | 27,54 | 27,21 | 28,45 | 36,52 | 29,70 | 31,58 | 28,95 |
| σ_{HD} (MPa) | 35,76 | 48,47 | 41,81 | 15,48 | 27,96 | 36,73 | 78,06 | 43,97 | 36,29 | 28,29 |
| Diferencia (MPa) | 5,46 | 18,47 | 11,26 | 12,06 | 0,75 | 8,28 | 41,54 | 14,27 | 4,71 | 0,66 |
| Error % | 18 | 62 | 37 | 44 | 3 | 29 | 114 | 48 | 15 | 2 |
| | V120-12 | V120-13 | V120-14 | V120-15 | V120-17 | V120-18 | V120-19 | V120-20 | V120-21 | |
| $\sigma_{m\acute{a}q.}$ (MPa) | 27,77 | 24,79 | 29,57 | 28,35 | 15,15 | 27,1 | 29,3 | 32,1 | 22,69 | |
| σ_{HD} (MPa) | 21,16 | 14,03 | 43,28 | 20,87 | 2,95 | 31,68 | 49,52 | 46,89 | 35,02 | |
| Diferencia (MPa) | 6,61 | 10,76 | 13,71 | 7,48 | 12,2 | 4,58 | 20,22 | 14,79 | 12,33 | |
| Error % | 24 | 43 | 46 | 26 | 81 | 17 | 69 | 46 | 54 | |

V120-n: V120. Viga de Pino Radiata de longitud 120cm n. Número del bloque ensayado

NOTA: Las vigas V120-4 y V120-16 colapsaron durante el ensayo (Figura 7.47). Tanto la Diferencia como el Error, se muestran en valores absolutos.

En la Tabla 7.25 se comparan la tensión conocida derivada de la carga aplicada en el laboratorio y la tensión calculada mediante el procedimiento de Hole Drilling. Se han realizado ensayos en veintiuna viguetas de 120 cm de longitud, de las cuales dos han colapsado en el proceso de carga o en la ejecución del taladro. De las diecinueve viguetas restantes se han obtenido resultados muy dispersos de los que no se puede concluir nada claro. En algunos casos las tensiones ejercidas mediante la máquina y las de Hole Drilling alcanzan diferencias intolerables, mientras que en otros casos los ajustes son muy buenos (Se procede a un estudio más detallado en el Capítulo 8).

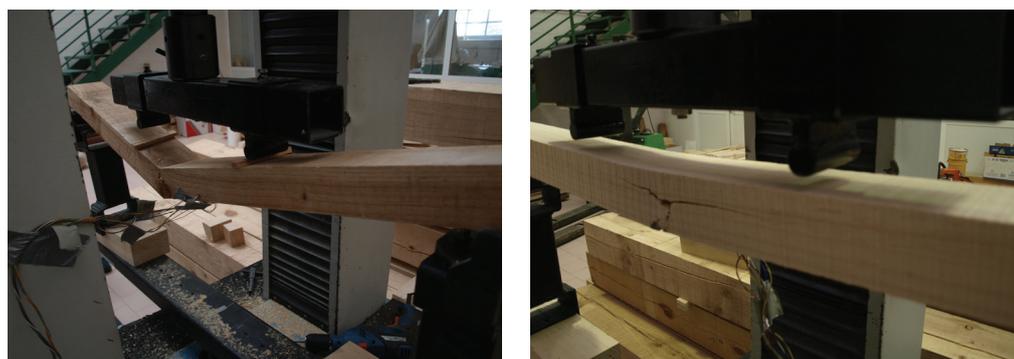


Figura 7.47

Colapso de las dos viguetas V120-4 y V120-16 durante los ensayos de comprobación a flexión

7.2.5 Limitaciones de los ensayos de flexo-tracción

Del mismo modo que ocurrió en la Fase I de la parte experimental, en flexión también se han advertido algunas limitaciones a la hora de llevar a la práctica estos ensayos. Se han ido afinando algunas cuestiones durante su propia ejecución, como las dimensiones de los tacos y la separación entre las cargas aplicadas.

Inexactitud de las probetas y las viguetas

Las probetas obtenidas en la carpintería, tanto las probetas como las vigas, no son paralelepípedos matemáticamente perfectos. Aunque a simple vista no se pueda apreciar, los planos que forman las probetas no son perfectamente paralelos ni perpendiculares entre sí. En consecuencia las cargas puntuales no se aplican perfectamente transversalmente a la pieza ni de manera simétrica, sino que se aleja de la situación óptima de flexión pura. Es posible que en esa situación, la fibra neutra no pase exactamente por donde se prevé teóricamente y que las tensiones calculadas a través de la carga aplicada difieran de la teoría.

Limitación dimensional de las probetas

Para la obtención de los valores de las constantes de *compliance*, resultan necesarias las probetas que se han presentado en este capítulo, con las fibras dispuestas en distintas posiciones respecto a la dirección longitudinal de la probeta. Las piezas obtenidas son parecidas al tamaño de un ladrillo, cuando resultaría ideal la realización de ensayo en piezas cuya longitud fuera mayor.

Los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral se refieren siempre a madera aserrada, y no otro producto derivado. De modo que la dimensión del tronco del árbol establece una limitación imposible de solventar para la obtención de los tacos perpendiculares y oblicuos.

Flexión escasa de los tacos

La limitación que existe para obtener piezas de mayor longitud con las características necesarias, se traduce en una flexión escasa de la pieza, sin llegar a las dimensiones que aconseja la Norma UNE-EN 408 para la realización de los ensayos (longitud de la pieza 18h). Ha tratado de corregirse mediante el correcto diseño de la pieza. Pese a que se han realizado numerosos ensayos, se ha ido afinando en cuestiones de diseño de la probeta y de la realización del ensayo. Al principio de la campaña experimental algunas de las probetas eran más gruesas de lo necesario impidiendo la flexión y la separación entre las cargas puntuales aplicadas, era mayor que la separación final, pasando de 11 cm a 6 cm.

Flexión escasa de las probetas

La dificultad de diseño radica en tener un canto (h) lo suficientemente pequeño para permitir la deformación por flexión pero suficiente para aguantar la carga aplicada y la ejecución del taladro, cuya profundidad alcanza los 16 mm.

Las probetas perpendiculares y las oblicuas, por anisotropía, son menos resistentes a la flexión y se ha producido el colapsado de algunas durante el ensayo, por lo que no han servido en la recolección de datos (Figura 7.48). A las probetas axiales se les ha aplicado 10 kN (5 kN en cada carga puntual) mientras que a las perpendiculares y oblicuas solamente 5 kN. Aún así, algunas probetas no soportaron la carga.



Figura 7.48
Ejemplos de probeta perpendicular (izquierda) y oblicua (derecha) tras colapsar

Dificultad de operar

La ejecución del agujero en la cara de máxima flexión se complica porque hay que acceder desde la parte inferior, entre los apoyos, y no hay suficiente espacio como para trabajar con comodidad. En el laboratorio han tenido que introducirse unas "calzas" debajo de los apoyos para alcanzar la altura suficiente de la probeta como para acceder con el taladro por la cara inferior. Se prevén dificultades también a la hora de aplicar la técnica en una estructura real.



Figura 7.49
Vista de la cara inferior del taco flexionado por la parte que se ha de realizar el taladro (izquierda) y dispositivo para someter a flexión los tacos (derecha)

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los ensayos de compresión son muy satisfactorios pero no tanto los de flexión. Al no poder extraer ninguna conclusión congruente tras de los resultados de esa segunda parte experimental, se procede a realizar un análisis más profundo con el fin de comprender las razones de la dispersión de los resultados en los ensayos de comprobación.

Se va a prestar especial atención al factor de anisotropía de la madera, a las distintas direcciones que pueden encontrarse en la estructura interna de la madera. No va a referirse solamente a la dirección de las fibras sino al tipo de plano sobre el que se ha realizado el ensayo.

8.1 Análisis geométrico de los ensayos

Se ha hecho hincapié a lo largo del documento en que la madera es un material heterogéneo y anisótropo, y que incluso tratándose de madera del mismo origen, un individuo puede ser bien diferente a otro. Hay que estudiar cada caso individualmente. Esta comprobación puede ayudar al estudio de los resultados obtenidos.

La dispersión de los resultados en los ensayos de comprobación de la fase de flexión, han dado lugar a un análisis más específico sobre la geometría y naturaleza de las piezas que han sido utilizadas en los ensayos. Normalmente, las piezas de gruesa escuadría están formadas por planos tangenciales a los anillos de crecimiento, quedando la médula en el interior de la pieza como ocurre en los ensayos de compresión. Las probetas utilizadas en esa primera fase son bloques cortados directamente de las vigas estructurales cuya sección transversal es de 20 cm x 20 cm. La probabilidad de que el ensayo haya sido efectuado en un plano axial-tangencial es muy alta.

Por el contrario, en la fase de flexión, las escuadrías de las piezas ensayadas son más reducidas y la heterogeneidad de los planos en los que se han adherido las rosetas es sensiblemente mayor. En los ejemplos reales de arquitectura los grandes elementos estructurales de madera aserrada, por sus amplias dimensiones, generalmente están formados por planos o caras tangenciales a

los anillos de crecimiento. Cuanto más grandes sean las escuadrías, más alta será la probabilidad de que los planos en los que se realice el ensayo Hole Drilling sean tangenciales. Al aserrar y escuadrar el tronco habitualmente se extrae una sola pieza estructural de grandes dimensiones (Figura 8.1, izquierda y centro).

En las viguetas de 120 cm de longitud utilizadas en los ensayos de comprobación la realidad es otra. Su sección transversal es de 9 cm x 6 cm y son viguetas extraídas de las vigas estructurales originales, cuya sección es de 20 x 20 cm. Con el ánimo de optimizar el material y el trabajo en la carpintería se han extraído varias viguetas de una misma viga original. Este factor hace que las caras que forman las viguetas sean de distinta índole y estén formadas por planos intermedios (Figura 8.1, derecha).

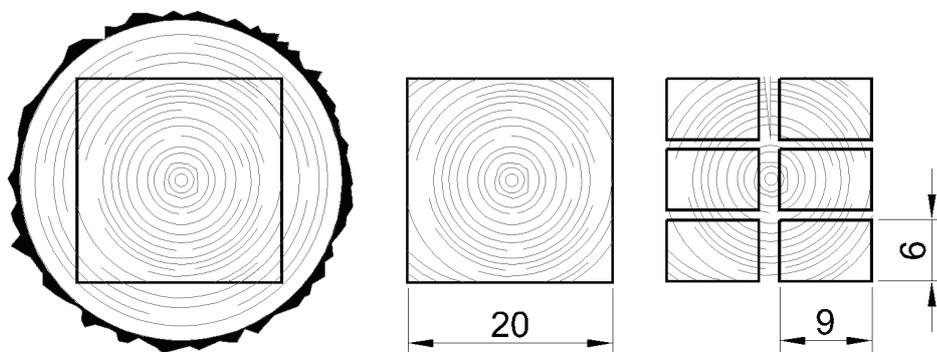


Figura 8.1
Extracción de piezas aserradas de un tronco en función de la escuadría de la pieza estructural

Se han comprobado los testeros de las viguetas de 120 cm de longitud utilizadas para la comprobación de los datos con el fin de discernir los planos verdaderamente tangenciales entre los intermedios y los radiales. La posibilidad de un plano formado por las direcciones axial y radial se ve muy mermada, porque precisa un corte pasando por la médula. La vigueta V120-16 (Figura 8.2), habiendo colapsado en el ensado, muestra un corte radial en una de sus caras. Aunque no es en el plano donde se realizó el ensayo de Hole Drilling, sino en la de compresión máxima en la parte superior de la imagen sirve como ejemplo de visualización de la médula de un plano axial-radial.



Figura 8.2
Corte radial por la médula (visible en el plano superior) en una de las viguetas de 120 cm de longitud

En la Figura 8.3 se muestran las testas de tres de las viguetas en las que el Hole Drilling se ha realizado en un plano perfectamente tangencial, mientras que en la Figura 8.4 las tres viguetas que se muestran han sido ensayadas en planos intermedios. En todas las fotografías, la cara inferior de la vigueta, donde se apoya el dedo pulgar, corresponde a la de máxima tracción donde se ha realizado la perforación.

Figura 8.3

Vista de las testas de tres viguetas de 120 cm utilizadas para la comprobación de los datos, en las que los planos donde se han realizado los ensayos son tangenciales a los anillos de crecimiento



Figura 8.4

Vista de las testas de tres viguetas de 120 cm utilizadas para la comprobación de los datos, en las que los planos donde se han realizado los ensayos son intermedios



Se pueden clasificar los ensayos de comprobación entre Tangencial, Radial o Intermedio según el tipo de plano sobre el que ha sido realizado el Hole Drilling. Si se observan los datos obtenidos en la comprobación de los elementos estructurales sometidos a flexión, se deduce que los realizados en las caras más intermedias son objetivamente peores que los realizados en planos tangenciales y se resumen los datos de comprobación exclusivamente a las viguetas cuyos planos son tangenciales o casi-tangenciales (Tabla 8.1 y Tabla 8.2).

Tabla 8.1

Clasificación de las viguetas utilizadas para la comprobación en el laboratorio según el tipo de plano donde se ha realizado el ensayo de Hole Drilling

| | |
|---|---|
| Plano Tangencial o casi-tangencial | V120-1, V120-6, V120-10, V120-11, V120-18, V120-19, V120-20, V120-21 |
| Plano Intermedio | V120-2, V120-3, V120-5, V120-7, V120-8, V120-9, V120-12, V120-13, V120-17 |
| Plano Radial | - |

Tabla 8.2

Comparación entre las tensiones aplicadas mediante el control de la máquina de compresión y las tensiones obtenidas mediante la formulación de Hole Drilling

| | V120-1 | V120-6 | V120-10 | V120-11 | V120-18 | V120-19 | V120-20 | V120-21 |
|----------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma_{m\acute{a}q.}$ (MPa) | 30,30 | 27,21 | 31,58 | 28,95 | 27,10 | 29,30 | 32,10 | 22,69 |
| σ_{HD} (MPa) | 35,76 | 27,96 | 36,29 | 28,29 | 31,68 | 49,52 | 46,89 | 35,02 |
| Diferencia (MPa) | 5,46 | 0,75 | 4,71 | 0,66 | 4,58 | 20,22 | 14,79 | 12,33 |
| Error % | 18 | 3 | 15 | 2 | 17 | 69 | 46 | 54 |

V120-n: V120. Viga de Pino Radiata de longitud 120cm n. Número del bloque ensayado

NOTA: Solamente se han estudiado las ocho viguetas cuyos planos son tangenciales

El análisis de los resultados en la viguetas de comprobación puede ajustarse más si se recalculan los módulos elásticos principales y la matriz de *compliance* teniendo en cuentas solamente las probetas formadas por planos tangenciales utilizadas en la obtención de los datos de los módulos elásticos y la matriz de *compliance*. Se han realizado algunos ensayos extra hasta completar ocho ejemplos de cada tipo de probeta pero formadas con planos tangenciales.

Módulos elásticos principales (Análisis Tangencial)

La extracción de los datos obtenidos teniendo en cuenta la geometría del plano en el que se ha llevado a cabo en ensayo ha servido recientemente para una publicación en la revista *Construction and Building Materials* (Sánchez-Beitia, Crespo de Antonio et al. 2015), en el que solamente se analizaban los resultados de cinco probetas de cada tipo (axial, perpendicular y oblicua) ensayados hasta el momento, eso sí sobre planos perfectamente tangenciales (PA11 y PO11).

Tabla 8.3

Resultados de los módulos elásticos E_y de las ocho probetas axiales ensayadas a flexo-tracción en planos tangenciales a los anillos de crecimiento del árbol (eliminando PA6-7-9 y añadiendo PA11)

| | PA1 | PA2 | PA3 | PA4 | PA5 | PA8 | PA10 | PA11 |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| E_y (MPa) | 10724 | 5660 | 6615 | 8391 | 6854 | 5844 | 5930 | 9215 |

Tabla 8.4

Resultados de los módulos elásticos E_x de las ocho probetas perpendiculares ensayadas a flexo-tracción en planos tangenciales a los anillos de crecimiento del árbol (eliminando PP6 y PP7)

| | PP1 | PP2 | PP3 | PP4 | PP5 | PA8 | PP9 | PP10 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| E_x (MPa) | 476 | 455 | 486 | 637 | 648 | 665 | 575 | 559 |

Los nuevos valores medios de los módulos de elasticidad principales obtenidos en los ensayos de compresión, teniendo en cuenta solamente los ensayos realizados en planos tangenciales, son los siguientes:

$$E_y = 7404 \text{ MPa}$$

$$E_x = 563 \text{ MPa}$$

Matriz de *compliance* (Análisis Tangencial)

Nuevamente, con los valores actualizados de los módulos elásticos y eliminando del cómputo las probetas que no se consideran tangenciales, se ha recalculado de la misma manera la matriz de *compliance* para elementos estructurales sometidos a flexo-tracción en planos tangenciales.

Tabla 8.5

Valores de las constantes de *compliance* de la 1ª columna de la matriz en los ensayos de flexo-tracción en las ocho probetas axial-tangenciales

| | PA1 | PA2 | PA3 | PA4 | PA5 | PA8 | PA10 | PA11 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| c₁₁ | -0,148 | -0,344 | -0,223 | -0,097 | -0,199 | -0,206 | -0,295 | -0,158 |
| c₂₁ | 0,072 | -0,098 | 0,038 | 0,053 | -0,023 | -0,074 | -0,090 | -0,090 |
| c₃₁ | 0,269 | 0,222 | 0,170 | 0,209 | 0,207 | 0,086 | 0,103 | 0,049 |

PA_n: P. Probeta A. Axial, en la dirección de las fibras n. Número de la probeta ensayada

Tabla 8.6

Valores de las constantes de *compliance* de la 3ª columna de la matriz en los ensayos de flexo-tracción en las ocho probetas perpendicular-tangenciales

| | PP1 | PP2 | PP3 | PP4 | PP5 | PP8 | PP9 | PP10 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| c₁₃ | 0,215 | 0,402 | 0,186 | 0,143 | 0,242 | 0,457 | -0,502 | 0,198 |
| c₂₃ | -0,680 | -0,522 | -0,015 | -0,404 | -0,217 | -0,310 | -0,364 | -0,233 |
| c₃₃ | -1,300 | -0,828 | -0,634 | -0,754 | -0,480 | -0,745 | -0,787 | -0,597 |

PP_n: P. Probeta P. Perpendicular, en la dirección transversal de las fibras n. Número de la probeta ensayada

Tabla 8.7

Valores de las constantes de *compliance* de la 2ª columna de la matriz en los ensayos de flexo-tracción en las ocho probetas oblicuo-tangenciales

| | PO2 | PO3 | PO6 | PO7 | PO8 | PO9 | PO10 | PO11 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| c₁₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| c₂₂ | 0,361 | 0,653 | 0,956 | 0,804 | 0,998 | 0,884 | 0,570 | 0,175 |
| c₃₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

PO_n: P. Probeta O. Oblicua, en una dirección oblicua de las fibras n. Número de la probeta ensayada

La Tabla 8.8 muestra las medidas de dispersión de los datos obtenidos en las tablas anteriores. Se toman los valores medios de cada constante de *compliance* para completar la nueva matriz.

Tabla 8.8

Medidas de dispersión de las constantes de *compliance* a flexión (solamente en planos tangenciales)

| | Media | Máx. | Min. | Rango | Varianza | Desv. Típica | Coef. Variación | E.S.M. | Int. Conf. 80% | Tamaño muestra |
|----------|--------|--------|--------|-------|----------|--------------|-----------------|--------|----------------|----------------|
| c_{11} | -0,209 | -0,051 | -0,344 | 0,293 | 0,014 | 0,118 | 56,5 | 0,042 | 0,053 | 8 |
| c_{21} | -0,027 | 0,142 | -0,098 | 0,240 | 0,009 | 0,094 | 348,1 | 0,033 | 0,043 | 8 |
| c_{31} | 0,164 | 0,312 | 0,049 | 0,263 | 0,011 | 0,104 | 63,4 | 0,037 | 0,047 | 8 |
| c_{13} | 0,168 | 0,872 | -0,502 | 1,374 | 0,223 | 0,472 | 281,0 | 0,167 | 0,214 | 8 |
| c_{23} | -0,343 | 0,568 | -0,680 | 1,248 | 0,217 | 0,466 | 135,9 | 0,165 | 0,211 | 8 |
| c_{33} | -0,766 | -0,337 | -1,300 | 0,963 | 0,098 | 0,313 | 40,9 | 0,111 | 0,142 | 8 |
| c_{22} | 0,675 | 1,186 | 0,091 | 1,095 | 0,190 | 0,435 | 64,4 | 0,154 | 0,197 | 8 |

En definitiva, el valor de la matriz que define el comportamiento elástico de elementos de pino radiata D. Don sometidos a flexión es el siguiente, siempre y cuando el ensayo de Hole Drilling se realice en un plano tangencial a los anillos de crecimiento y en la cara de máxima tracción:

$$C_{PRflex.tan} = \begin{pmatrix} -0,209 & 0 & 0,168 \\ -0,027 & 0,675 & -0,343 \\ 0,164 & 0 & -0,766 \end{pmatrix}$$

Ensayos de comprobación (Análisis Tangencial)

Recalculados los módulos elásticos y la matriz de *compliance* sin mediar los datos de las probetas que no se consideran tangenciales, se vuelven a realizar las comprobaciones entre las tensiones existentes en las viguetas de 120 cm aplicadas a través de la máquina y las tensiones calculadas mediante el procedimiento de Hole Drilling (Tabla 8.9).

Tabla 8.9

Comparación entre las tensiones aplicadas mediante el control de la máquina y las tensiones obtenidas mediante la formulación de Hole Drilling en las viguetas de comprobación

| | V120-1 | V120-2 | V120-3 | V120-5 | V120-6 | V120-7 | V120-8 | V120-9 | V120-10 | V120-11 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma_{m\acute{a}q.}$ (MPa) | 30,30 | 30,00 | 30,55 | 27,54 | 27,21 | 28,45 | 36,52 | 29,70 | 31,58 | 28,95 |
| σ_{HD} (MPa) | 25,76 | 32,12 | 28,68 | 13,56 | 20,38 | 23,99 | 52,16 | 30,52 | 26,38 | 21,93 |
| Diferencia (MPa) | 4,54 | 2,12 | 1,87 | 13,98 | 6,83 | 4,46 | 15,64 | 0,82 | -5,20 | 7,02 |
| Error % | 15 | 7 | 6 | 51 | 25 | 16 | 43 | 3 | 16 | 24 |
| | V120-12 | V120-13 | V120-14 | V120-15 | V120-17 | V120-18 | V120-19 | V120-20 | V120-21 | |
| $\sigma_{m\acute{a}q.}$ (MPa) | 27,77 | 24,79 | 29,57 | 28,35 | 15,15 | 27,10 | 29,30 | 32,10 | 22,69 | |
| σ_{HD} (MPa) | 16,96 | 11,74 | 29,66 | 15,53 | 3,48 | 21,67 | 32,94 | 31,37 | 22,34 | |
| Diferencia (MPa) | 10,81 | 13,05 | 0,09 | 12,82 | 11,67 | 5,43 | 3,64 | 0,73 | 0,35 | |
| Error % | 39 | 53 | 0 | 45 | 77 | 20 | 12 | 2 | 2 | |

V120-n: V120. Viga de Pino Radiata de longitud 120cm n. Número de la vigueta ensayada

NOTA: Las vigas V120-4 y V120-16 colapsaron durante el ensayo. Tanto la Diferencia como el Error, se muestran en valores absolutos.

Los resultados de la Tabla 8.9 son notablemente mejores en general utilizando los datos obtenidos de las probetas tangenciales. Quitando los errores que se dan en las Viguetas V120-5, V120-8, V120-12, V120-13, V120-15 y V120-17, resto de los resultados (13 de 19 viguetas, alcanzo un 68,4% de la muestra) dan errores menores que el 25%. En la Tabla 8.10 se extraen exclusivamente los resultados referidos las viguetas con caras tangenciales:

Tabla 8.10

Comparación entre las tensiones aplicadas mediante el control de la máquina y las tensiones obtenidas mediante la formulación de Hole Drilling en las viguetas de comprobación (solamente en planos tangenciales)

| | V120-1 | V120-6 | V120-10 | V120-11 | V120-18 | V120-19 | V120-20 | V120-21 |
|---------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma_{\text{máq.}}$ (MPa) | 30,30 | 27,21 | 31,58 | 28,95 | 27,10 | 29,30 | 32,10 | 22,69 |
| σ_{HD} (MPa) | 25,76 | 20,38 | 26,38 | 21,93 | 21,67 | 32,94 | 31,37 | 22,34 |
| Diferencia (MPa) | 4,54 | 6,83 | -5,2 | 7,02 | 5,43 | 3,64 | 0,73 | 0,35 |
| Error % | 15 | 25 | 16 | 24 | 20 | 12 | 2 | 2 |

V120-n: V120. Viga de Pino Radiata de longitud 120cm n. Número de la vigueta ensayada

Por analogía, tras análisis de las viguetas de comprobación de la parte dedicada a los esfuerzos de flexión, se han estudiado las probetas utilizadas en la ejecución de los ensayos de compresión pese a que los resultados fueron satisfactorios.

Durante el proceso de ensayo a estas probetas también se les ha denominado “bloques” por su geometría, siendo piezas directamente cortadas de las vigas estructurales. Estos bloques mantienen la escuadría original de las vigas (20 cm x 20 cm), formando piezas con cuatro planos tangenciales a los anillos de crecimiento en los que se puede realizar el ensayo con probabilidad de que se trate de un plano axial-tangencial. En estas probetas, por tanto, la variabilidad es mucho menor. Por su parte, los planos que forman las testas están compuestos por las direcciones radial y tangencial, pudiendo visualizarse los anillos concéntricos de crecimiento alrededor de la médula perfectamente. Las testas forman las superficies de apoyo o de contacto con la máquina de compresión.



Figura 8.5

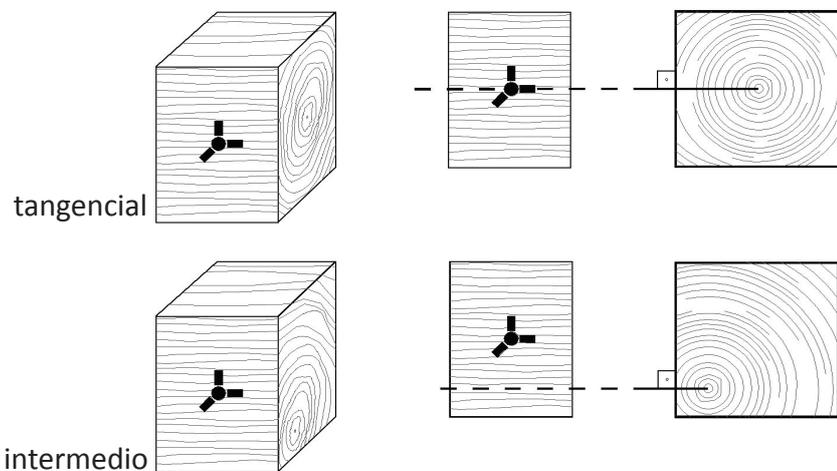
Sección transversal de las vigas utilizadas para la extracción de los bloques

En la mayoría de las probetas la médula queda más o menos centrada en el interior del bloque (Figura 8.5). Sin embargo, pueden aparecer fendas radiales, nudos de cara o cualquier otra variación, obligando a tener que desplazar

la roseta y el punto de perforación del centro. A diferencia de lo que ocurre en las probetas de los ensayos de flexión, en los bloques de los ensayos de compresión la “tangencialidad” puede perderse al desplazar la roseta del punto de tangencialidad exacto. En función del lugar exacto en el que se adhiriera la roseta, puede tratarse de un plano axial-tangencial, de un plano axial-radial o de un plano intermedio. La elección de la ubicación de la roseta, tanto el plano como la posición geométrica en la cara, juegan un papel crucial en los resultados obtenidos como se mostrará más adelante. Este es un factor que se ha tenido en cuenta a posteriori, ya que durante la ejecución de los ensayos por alguna razón el punto seleccionado para la realización del ensayo ha tenido que ser desplazado del punto de tangencia ideal (Figura 8.6).

Figura 8.6

Diferentes posiciones de la roseta en función de la ubicación de la médula en la sección transversal y en función de su posición geométrica en el plano



En el caso del Bloque 6 (Figura 8.7), habiendo dado resultados anómalos en el Capítulo 7, se estudia con especial detenimiento. En la Cara 1, testada a compresión axial o paralela a las fibras, la roseta tuvo que ser desplazada del centro debido a la existencia de una fenda de secado. En la Cara 2, preparada para la compresión perpendicular, la roseta también tuvo que ser desplazada del centro geométrico de la cara, en este caso, por la presencia de un nudo. Los ensayos de compresión en este bloque, por tanto, no han sido realizados en planos perfectamente tangenciales, sino que se trata de planos intermedios. Por esta razón los resultados en esta probeta no han sido los esperados.

Figura 8.7

Fotografías del Bloque 6 por las dos caras opuestas. A la izquierda, roseta adherida para ser sometida a compresión axial y, a la derecha, roseta adherida para ser sometida a compresión perpendicular



Durante la realización de los ensayos en el laboratorio no se tuvieron en cuenta las diferencias entre los planos tangenciales e intermedios tras haber desplazado la roseta por alguna singularidad. Sin embargo, a partir de ahora se aconseja tener en cuenta la posición de la médula con respecto del punto donde se vaya a realizar la perforación. Ese desplazamiento puede suponer un alejamiento de la condición tangencial, dando resultados anómalos.

En el Capítulo 7 se comprobó que los datos registrados en el ensayo del bloque B6 eran anómalos. Se vuelven, por lo tanto, a calcular los módulos elásticos y la matriz de compliance a compresión, eliminando del promedio los datos aportados por el Bloque 6.

Módulos elásticos principales (Análisis Tangencial)

La Tabla 8.11 muestra los resultado anteriormente analizados de los módulos elásticos principales E_y y E_x . En este caso se han eliminado los datos del Bloque 6 (B6).

Tabla 8.11

Resultados de los módulos elásticos principales E_y y E_x de los nueve bloques ensayados en compresión considerados tangenciales

| | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B7 | B8 | B9 | B10 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| E_y (MPa) | 13492 | 6221 | 8074 | 12333 | 18823 | 13339 | 18702 | 12107 | 10871 |
| E_x (MPa) | 167 | 295 | 706 | 414 | 332 | 979 | 423 | 482 | 387 |

Tabla 8.12

Medidas de dispersión de los módulos elásticos tangenciales

| | Media | Máx. | Min. | Rango | Varianza | Desv. Típica | Coef. Variación | E.S.M. | Tamaño muestra |
|-----------------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-----------------|-------------------------|----------------------------|---------------|---------------------------|
| E_y (MPa) | 12662 | 18823 | 6221 | 12601 | 1749789 | 1323 | 10,4 | 441 | 9 |
| E_x (MPa) | 465 | 979 | 167 | 812 | 5784 | 76 | 16,4 | 25 | 9 |

Los nuevos valores medios de los módulos de elasticidad principales obtenidos en los ensayos de compresión, teniendo en cuenta solamente los ensayos realizados en planos tangenciales, son los siguientes:

$$E_y = 12662 \text{ MPa}$$

$$E_x = 465 \text{ MPa}$$

Matriz de *compliance* (Análisis Tangencial)

La Tabla 8.13 muestra las medidas de dispersión de esos datos, habiendo eliminado los resultados del Bloque 6 (B6). Se toman los valores medios de cada constante de *compliance* para completar la matriz.

Tabla 8.13

Medidas de dispersión de las constantes de *compliance* a compresión (solamente en planos tangenciales)

| | Media | Máx. | Min. | Rango | Varianza | Desv. Típica | Coef. Variación | E.S.M. | Int. Conf. 80% | Tamaño muestra |
|----------|--------|--------|--------|-------|----------|--------------|-----------------|--------|----------------|----------------|
| c_{11} | -0,643 | 0,091 | -2,075 | 2,166 | 0,383 | 0,619 | 96,2 | 0,206 | 0,264 | 9 |
| c_{21} | -0,277 | 0,418 | -1,278 | 1,696 | 0,230 | 0,479 | 173,1 | 0,16 | 0,205 | 9 |
| c_{31} | -0,126 | 0,686 | -0,886 | 1,572 | 5,679 | 2,383 | 1891,3 | 0,794 | 1,018 | 9 |
| c_{13} | 0,139 | 0,679 | -0,576 | 1,255 | 0,245 | 0,495 | 356,4 | 0,165 | 0,212 | 9 |
| c_{23} | -0,949 | -0,051 | -1,858 | 1,807 | 0,285 | 0,534 | 56,3 | 0,178 | 0,228 | 9 |
| c_{33} | -2,301 | -0,483 | -3,859 | 3,376 | 1,252 | 1,119 | 48,6 | 0,373 | 0,478 | 9 |
| c_{22} | 1,743 | 3,206 | 0,181 | 3,025 | 0,780 | 0,883 | 50,7 | 0,208 | 0,267 | 18 |

En definitiva, el valor de la matriz que define el comportamiento elástico de elementos de pino radiata D. Don sometidos a compresión es el siguiente, siempre y cuando el ensayo de Hole Drilling se realice en un plano tangencial a los anillos de crecimiento:

$$C_{PRcomp,tan} = \begin{pmatrix} -0,643 & 0 & 0,139 \\ -0,277 & 1,743 & -0,949 \\ -0,126 & 0 & -2,301 \end{pmatrix}$$

Ensayos de comprobación

Recalculados los módulos elásticos y la matriz de *compliance* sin mediar los datos del Bloque 6, se vuelven a realizar las comprobaciones entre las tensiones existentes en los bloques aplicadas a través de la máquina de compresión y las tensiones calculadas mediante el procedimiento de Hole Drilling (Tabla 8.14).

Tabla 8.14

Comparación entre las tensiones aplicadas mediante el control de la máquina de compresión y las tensiones obtenidas mediante la formulación de Hole Drilling

| | BN1 | BN2 | BN3 | BN4 | BN5 | BN6 | BN7 | BN8 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\sigma_{máq.}$ (MPa) | -4,64 | -4,37 | -4,35 | -4,31 | -4,29 | -4,43 | -3,51 | -3,95 |
| σ_{HD} (MPa) | -4,63 | -3,33 | -3,98 | -4,33 | -2,55 | -4,30 | -2,33 | -2,77 |
| Diferencia (MPa) | 0,01 | 1,04 | 0,37 | 0,02 | 1,74 | 0,13 | 1,18 | 1,18 |
| Error % | 0 | 24 | 9 | 0 | 41 | 3 | 34 | 30 |

BNn: B. Bloque N. Nuevo, de comprobación n. Número del bloque ensayado

NOTA: Tanto las Diferencias como los Errores se reflejan en sus valores absolutos

8.2 Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos en este trabajo experimental son pioneros y sirven para asentar la primera piedra de la aplicación de la técnica Hole Drilling sobre elementos estructurales de madera. El objetivo final de esta investigación es deducir el estado de tensiones en una estructura real y en servicio, en las que frecuentemente es escasa la información técnica al respecto, sobre todo en cuanto a la distribución de cargas y los estados de tensiones. El dato que aporta esta técnica a la inspección in situ es fundamental, asumiendo un daño mínimo.

Todas las piezas ensayadas en la elaboración de este documento proceden de vigas estructurales de *pinus radiata* D. Don, extraídas de bosques vascos y sin ningún tratamiento especial, simplemente secada y aserrada. Los parámetros que influyen en la investigación han sido deducidos ex profeso en el laboratorio, sin coger ningún valor bibliográfico o de la normativa.

8.2.1 Fase I: Compresión

El objetivo en los resultados de los ensayos de compresión en el laboratorio es que la tensión transmitida por la carga en la máquina se asemeje, dentro de un margen de error, al valor de la tensión obtenido mediante la formulación de Hole Drilling tras haber realizado la perforación. De los ocho Bloques Nuevos (BN) ensayados, todos bajo una compresión perpendicular a la dirección de las fibras, siete (el 87,5% de los bloques ensayados) han dado errores inferiores al 27%.

Tabla 8.15

Comparación entre las tensiones aplicadas mediante el control de la máquina de compresión y las tensiones obtenidas mediante la formulación de Hole Drilling

| | BN1 | BN2 | BN3 | BN4 | BN5 | BN6 | BN7 | BN8 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\sigma_{\text{máq.}}$ (MPa) | -4,64 | -4,37 | -4,35 | -4,31 | -4,29 | -4,43 | -3,51 | -3,95 |
| σ_{HD} (MPa) | -5,15 | -3,75 | -4,35 | -4,77 | -2,85 | -4,30 | -2,55 | -3,03 |
| Diferencia (MPa) | 0,51 | 0,62 | 0 | 0,46 | 1,44 | 0,13 | 0,96 | 0,92 |
| Error % | 11 | 14 | 0 | 11 | 34 | 3 | 27 | 23 |

BNn: B. Bloque N. Nuevo, de comprobación n. Número del bloque ensayado

NOTA: Tanto las Diferencias como los Errores se reflejan en sus valores absolutos

La primera matriz de *compliance* se obtuvo mediante los ensayos realizados en diez bloques sometidos a carga axial y a carga perpendicular, y otros diez bloques especiales sometidos a compresión oblicua pero ensayados en dos caras, es decir, 20 resultados. Los intervalos de confianza para las constantes de *compliance* se han calculado al 80%, por deberse a un material heterogéneo y a una muestra relativamente pequeña.

Por lo tanto los valores de las constantes de *compliance* distintas a cero se representan según estos valores de intervalo de confianza: $c_{11} = -0,789 \pm 0,263$, $c_{21} = -0,419 \pm 0,200$, $c_{31} = -0,092 \pm 0,197$, $c_{13} = 0,075 \pm 0,209$, $c_{23} = -1,030 \pm 0,228$, $c_{33} = -2,359 \pm 0,472$ y $c_{22} = 2,110 \pm 0,277$.

En la revisión de los resultados se descartaron los datos obtenidos tras los ensayos en el Bloque 6, por ser anómalos. Los resultados finales de los módulos elásticos y la matriz de *compliance* para este tipo de sollicitación han sido extraídos de una muestra de nueve probetas. De los ocho Bloques Nuevos ensayados, todos bajo una compresión perpendicular a la dirección de las fibras, cinco (el 62,5% de los bloques ensayados) han dado errores iguales o inferiores al 24%. Aunque tres de las probetas, BN1, BN3 y BN6, se ajustan a la perfección.

Tabla 8.16

Comparación entre las tensiones aplicadas mediante el control de la máquina de compresión y las tensiones obtenidas mediante la formulación de Hole Drilling

| | BN1 | BN2 | BN3 | BN4 | BN5 | BN6 | BN7 | BN8 |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\sigma_{m\acute{a}q.}$ (MPa) | -4,64 | -4,37 | -4,35 | -4,31 | -4,29 | -4,43 | -3,51 | -3,95 |
| σ_{HD} (MPa) | -4,63 | -3,33 | -3,98 | -4,33 | -2,55 | -4,30 | -2,33 | -2,77 |
| Diferencia (MPa) | 0,01 | 1,04 | 0,37 | 0,02 | 1,74 | 0,13 | 1,18 | 1,18 |
| Error % | 0 | 24 | 9 | 0 | 41 | 3 | 34 | 30 |

BNn: B. Bloque N. Nuevo, de comprobación n. Número del bloque ensayado

NOTA: Tanto las Diferencias como los Errores se reflejan en sus valores absolutos

Aunque en los resultados de los ensayos de comprobación no se mostraron mejoras y se recomienda el cálculo mediante la primera matriz de *compliance*, teniendo en cuenta los resultados del Bloque 6.

Reparando a los resultados obtenidos en ambos casos, los bloques de comprobación BN5, BN7 y BN8 se observan los peores resultados utilizando cualquiera de las dos matrices. Todo apunta a que la causa sea un nudo que además ha obligado el desplazamiento de la roseta en el caso del BN5 y a una lubricación escasa o ineficaz entre las probetas y el grupo de compresión en los otros dos casos, BN7 y BN8 (Figura 8.8).

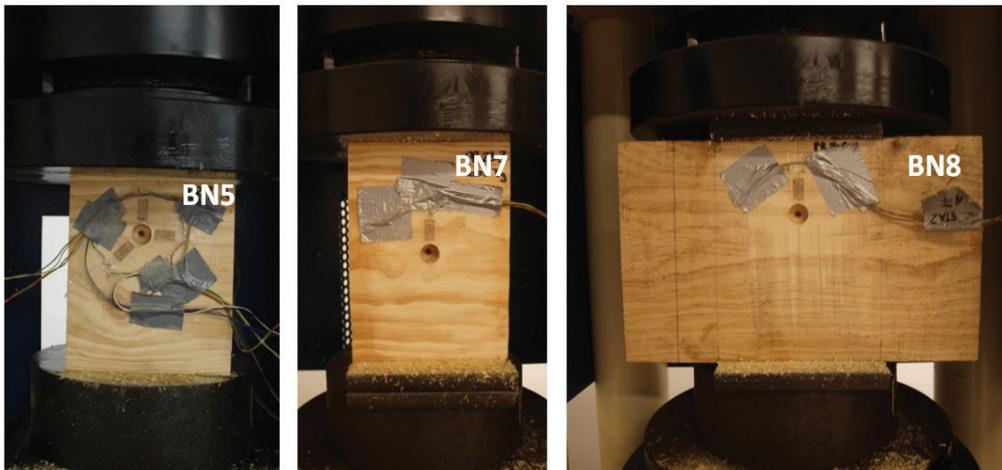


Figura 8.8
Ensayos de comprobación a
compresión perpendicular
en los Bloques Nuevos
BN5, BN7 y BN8

Por otro lado, durante los ensayos de comprobación a compresión perpendicular, se llegó a la conclusión de que para la comparación únicamente afecta al cálculo la deformación existente en la dirección que se ejerce la carga. En ese caso tensión ejercida sobre la probeta es perpendicular a la fibra (σ_x), y la deformación en esa dirección (ϵ_3) es la captada por la Galga 3. Para la comparación entre la tensión ejercida por el grupo compresor y la tensión de cálculo por Hole Drilling, las deformaciones ϵ_1 y ϵ_2 no tienen significancia, y pueden ahorrarse en el ensayo. Sí son necesarias, en cambio, para obtener los valores de la matriz de *compliance*. Los ensayos realizados en la última fase fueron realizados con disponiendo una sola galga en la dirección de la carga.

El caso BN8 es especial también por otra razón, y es que se trató de testar un bloque cuyas dimensiones fuesen mayores, más parecida a una zapata. Se dispusieron unas pletina metálicas para establecer una superficie de contacto conocida y medible. Sin embargo, el diseño de esta probeta dio lugar a complicaciones en el deslizamiento lateral de la pieza, pero no se obtuvo una expansión lateral libre de la pieza, dando resultados peores.

8.2.2 Fase II: Flexión

Se vuelve a aludir a la necesidad de conocer el estado de tensiones real en una estructura en servicio cuando se acomete un proyecto de restauración o rehabilitación. Conocido el estado tensional en el que se encuentra un determinado elemento estructural, se puede tomar una determinación fundamentada si hay necesidad de sustitución, por ejemplo. A continuación se muestra la discusión de los resultados obtenidos para elementos sometidos a flexión.

El objetivo es que la tensión transmitida por la carga en la máquina se asemeje, dentro de un margen de error, al valor de la tensión obtenido mediante la formulación de Hole Drilling tras haber realizado la perforación. Con la matriz y los módulos elásticos originales, en el caso de las ocho viguetas que cumplen con las condiciones de tangencialidad, cinco (el 62,5% de las viguetas) han dado errores inferiores al 18%.

Tabla 8.17

Comparación entre las tensiones aplicadas mediante el control de la máquina de compresión y las tensiones obtenidas mediante la formulación de Hole Drilling

| | V120-1 | V120-6 | V120-10 | V120-11 | V120-18 | V120-19 | V120-20 | V120-21 |
|---------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma_{\text{máq.}}$ (MPa) | 30,30 | 27,21 | 31,58 | 28,95 | 27,10 | 29,30 | 32,10 | 22,69 |
| σ_{HD} (MPa) | 35,76 | 27,96 | 36,29 | 28,29 | 31,68 | 49,52 | 46,89 | 35,02 |
| Diferencia (MPa) | 5,46 | 0,75 | 4,71 | 0,66 | 4,58 | 20,22 | 14,79 | 12,33 |
| Error % | 18 | 3 | 15 | 2 | 17 | 69 | 46 | 54 |

V120-n: V120. Viga de Pino Radiata de longitud 120cm n. Número del bloque ensayado

NOTA: Solamente se han estudiado las ocho viguetas cuyos planos son tangenciales

Pero si, además se ciñe más el abanico y se calcula una matriz *compliance* para aplicar en los caso de tangencialidad, los resultados se ajustan todavía más. En este último ajuste, de las ocho viguetas que cumplen las condiciones de tangencialidad el 100% concuerda con la tensión ejercida mediante la máquina de ensayo con un error igual o inferior al 25% (Tabla 8.18). Este resultado es muy admisible.

Tabla 8.18

Comparación entre las tensiones aplicadas mediante el control de la máquina y las tensiones obtenidas mediante la formulación de Hole Drilling en las viguetas de comprobación (solamente en planos tangenciales)

| | V120-1 | V120-6 | V120-10 | V120-11 | V120-18 | V120-19 | V120-20 | V120-21 |
|---------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma_{\text{máq.}}$ (MPa) | 30,30 | 27,21 | 31,58 | 28,95 | 27,10 | 29,30 | 32,10 | 22,69 |
| σ_{HD} (MPa) | 25,76 | 20,38 | 26,38 | 21,93 | 21,67 | 32,94 | 31,37 | 22,34 |
| Diferencia (MPa) | 4,54 | 6,83 | -5,2 | 7,02 | 5,43 | 3,64 | 0,73 | 0,35 |
| Error % | 15 | 25 | 16 | 24 | 20 | 12 | 2 | 2 |

V120-n: V120. Viga de Pino Radiata de longitud 120cm n. Número del bloque ensayado

Finalmente se estudia la nueva matriz de *compliance*, la que se obtuvo mediante el promedio de los ensayos realizados en los tacos tangenciales únicamente. Por lo tanto los valores de las constantes de *compliance* distintas a cero se representan según estos valores de intervalo de confianza: $c_{11} = -0,209 \pm 0,053$, $c_{21} = -0,027 \pm 0,043$, $c_{31} = 0,164 \pm 0,047$, $c_{13} = 0,168 \pm 0,214$, $c_{23} = -0,343 \pm 0,211$, $c_{33} = -0,766 \pm 0,142$ y $c_{22} = 0,675 \pm 0,197$.

Capítulo 9

EJEMPLOS DE APLICACIÓN EN ESTRUCTURAS REALES

Los datos y resultados obtenidos en la fase experimental de esta Tesis Doctoral han servido para establecer unos valores de los módulos de elasticidad y de la matriz de *compliance* para los elementos estructurales, siempre que se hayan extraído de madera de pino radiata D. Don. Se han obtenido distintos datos dependiendo de las distintas funciones que cumplan en el conjunto estructural y en función de la geometría del plano sobre el que se haya realizado el orificio, tangencial o intermedio. Es necesario ese trabajo previo de laboratorio antes de medir las tensiones en una estructura real.

El objetivo de esta parte es confirmar que la técnica Hole Drilling es válida para aplicaciones reales. A priori, la aplicación in situ de la técnica no debe diferenciarse tanto de la del laboratorio, pero se prevé que el hecho de trabajar a pie de obra puede resultar más dificultoso o, al menos, más engorroso que en el laboratorio. Sirvan estas primeras aplicaciones reales para establecer una metodología de actuación en el caso de una estructura existente.

Dentro de la inspección in situ de las estructuras de madera, se distinguen varios niveles en función del conocimiento que se alcance. La inspección siempre debe comenzar con un reconocimiento más generalista y continuar profundizando en aquellas partes o elementos que se vean dañados. En algunas ocasiones conocer el estado de tensiones de un determinado elemento es fundamental para determinar si requiere un apuntalamiento o refuerzo de la estructura mientras se realizan otros trabajos de restauración o incluso para establecer el cierre del edificio, en el caso de estar al límite de la capacidad resistente de la estructura. En el caso de medir el estado de tensiones de un elemento concreto durante la inspección, se puede decidir si puede seguir cumpliendo su función estructural, si necesita ser reforzado o, si por el contrario, merece la pena ser sustituido.

La puesta a punto de la técnica de Hole Drilling puede darse por concluida con los ejemplos de aplicación en estructuras reales que se presentan a lo largo de este capítulo. La especie arbórea objeto de esta Tesis Doctoral ha sido el pino radiata, de momento la única especie caracterizada en el laboratorio para poder establecer las relaciones de ortotropía mediante las deformaciones por

relajación de Hole Drilling. No es habitual encontrar estructuras históricas de pino radiata, pero sí en restauraciones y refuerzos, como sucede algunos de los ejemplos se han estudiado piezas nuevas colocadas en edificios históricos.

Los ejemplos de aplicación de este capítulo están formados por una viga perimetral del forjado original en una vivienda del casco histórico de Pamplona, un par de viguetas en un forjado nuevo en un caserón del municipio de Mezquiritz, una viga de cubierta recientemente colocada en la renovación de una cubierta en una vivienda unifamiliar de la localidad de Tolosa y un par de viguetas de forjado, a punto de ser derribado, en una vivienda abandonada y pendiente de ser restaurada en San Sebastián.

9.1 Ejemplo I: Vivienda C/Ansoleaga de Pamplona (Navarra)

Descripción de la situación

La Calle Ansoleaga, que tiene este nombre en honor al arquitecto Florencio de Ansoleaga, forma parte del casco histórico de Pamplona, cerrando por el Noroeste la Plaza San Francisco. Esta calle es límite entre los antiguos “burgos” de San Cernin y de San Nicolás, de la ciudad de Pamplona (Figura 9.1).



Figura 9.1
Plano de Pamplona con la
ubicación del edificio del
Ejemplo I

El primer ensayo de aplicación de la técnica de Hole Drilling se va a realizar en un edificio situado en esta plaza (Figura 9.2). El edificio fue construido a finales del siglo XIX y su estructura es fundamentalmente de madera. Según los datos aportados por los propietarios, a mediados de los años 80 del siglo pasado hubo una reforma general en el edificio, renovándose la fachada y la cubierta, pero manteniendo intactos los forjados debido a su buen estado de conservación. El edificio mantiene, por tanto, su estructura original y los forjados tradicionales.



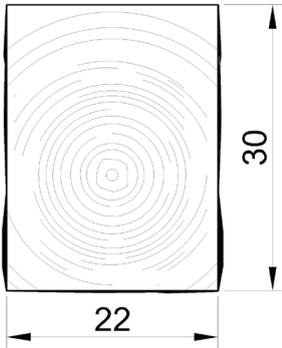
Figura 9.2
Vistas de la fachada del edificio estudiado desde la Plaza San Francisco de Pamplona

Se ha procedido a la realización de un ensayo de Hole Drilling en una de las vigas de forjado de la vivienda de la tercera planta. En concreto en una de las vigas perimetrales de una de las habitaciones, en la fachada que cierra el patio interior (Figura 9.3). Ni la estructura en general, ni concretamente la viga analizada, presentan anomalía alguna ni patologías visibles. Se trata de una viga sana en la que se desea confirmar los datos obtenidos en el laboratorio.



Figura 9.3
Vistas de la viga ensayada con la roseta colocada en el centro del vano

Datos
Viga perimetral



Dimensiones viga:

$h = 30 \text{ cm}$ $b = 22 \text{ cm}$ $L = 430 \text{ cm}$

Humedad:

$H_r = 12,5 \%$

Inercia de la sección transversal:

$I = b \cdot h^3 / 12 = 49500 \text{ cm}^4$

Distancia entre la Línea Neutra y el punto de Hole Drilling:

$d = h/2 = 15 \text{ cm}$

Módulo Resistente de la sección transversal:

$W = I/d = b \cdot h^2 / 6 = 3300 \text{ cm}^3$

Cálculo de tensiones mediante la técnica de Hole Drilling

Se realiza la operación de Hole Drilling tras haber preparado correctamente la superficie en el centro del vano, donde el momento flector es máximo, y tras haber realizado las conexiones pertinentes. Se recogen los siguientes datos de deformación en las proximidades de la perforación al finalizar el ensayo (Figura 9.4):

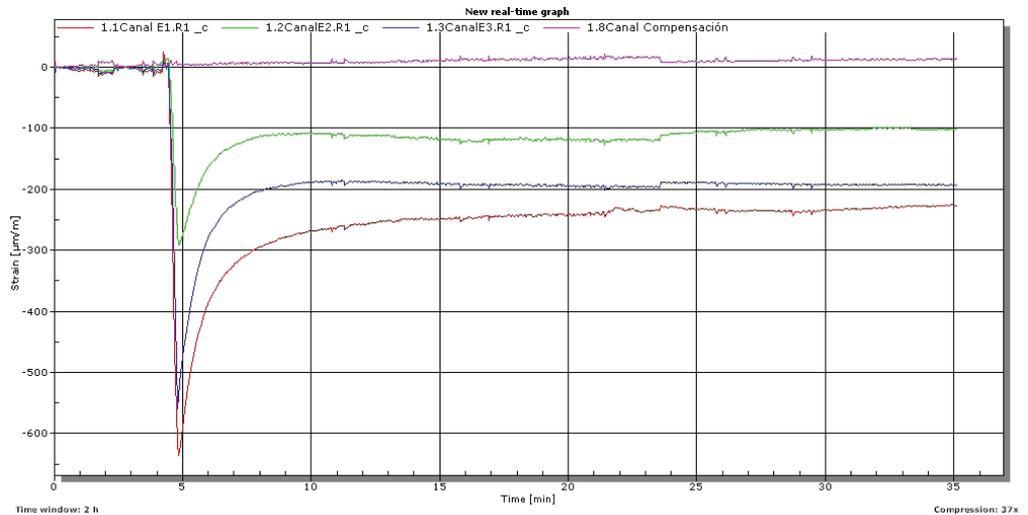


Figura 9.4

Resultados deformaciones tras la realización del Hole Drilling en la viga perimetral del Caso I

Los resultados finalmente registrados por las bandas de extensométricas en el minuto 35 del ensayo tras realizar el orificio son los siguientes (Canal de compensación= 5 µm/m):

$\epsilon_1 = -226 \text{ µm/m}$

$\epsilon_2 = -100 \text{ µm/m}$

$\epsilon_3 = -193 \text{ µm/m}$

Al tratarse de una viga de grandes dimensiones, se adopta la hipótesis de que el plano sobre el que se va a realizar el ensayo es tangencial o casi-tangencial. Por tanto se han tomado los valores de la matriz de *compliance* para el caso de realizar la operación de Hole Drilling en un plano tangencial, con sus respectivos valores de los módulos elásticos:

$$C_{PR/lex.tan} = \begin{pmatrix} -0,209 & 0 & 0,168 \\ -0,027 & 0,675 & -0,343 \\ 0,164 & 0 & -0,766 \end{pmatrix} \begin{matrix} E_y = 7404 \text{ MPa} \\ E_x = 563 \text{ MPa} \end{matrix}$$

Resolviendo la ecuación matricial de Hole Drilling para materiales ortotrópicos, pasando la matriz de *compliance* al otro miembro mediante el cálculo de la inversa, se obtienen los siguientes resultados de tensión:

$$\sigma_y = 3,17 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = 0,43 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = 1,19 \text{ MPa}$$

Cálculo peso real de la construcción

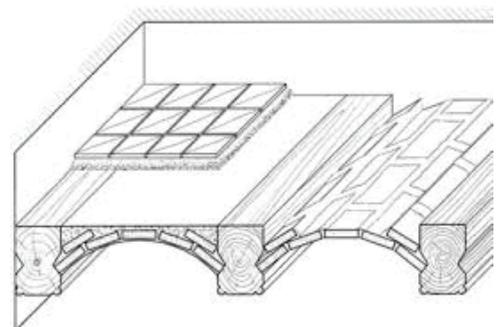
La tensión paralela a la dirección de las fibras es $\sigma_y = 3,17 \text{ MPa}$, obtenida mediante el ensayo y la formulación de Hole Drilling. Aunque la carga real es desconocida, se realiza a continuación un cálculo según las cargas constructivas que puede estar soportando esta viga. El valor obtenido mediante las ecuaciones de Hole Drilling se compara con la carga real existente en la viga. Habiendo medido la geometría de la viga (longitud y sección transversal) podrá calcularse el momento flector derivado de la carga uniformemente distribuida que le corresponde del forjado.

Sobre esta viga perimetral se apoya el forjado y la fachada del patio que cierra esta parte de la habitación. Aunque no queda a la vista, porque está tapado por un falso techo, siendo un forjado tradicional y original en el edificio desde su construcción, se supone que seguirá siendo como se indica en los planos cedidos por el propietario: un forjado de revoltón, con viguetas de madera y bovedillas de rasilla (Figura 9.5).

Se consideran los siguientes pesos propios sobre la viga objeto de estudio. La densidad media de la madera es 410 kg/m^3 , al tratarse de pino radiata D. Don de tamaño estructural. La distancia entre vigas es de 3 m , y siendo ésta una viga perimetral, le corresponde $1,5 \text{ m}$ del peso del forjado. Además debe sumarse al peso propio de la viga y del forjado, el peso del cerramiento del patio interior, cuyo espesor es de 11 cm y está compuesta por ladrillo macizo. No se tienen en cuenta las mayoraciones ni las sobrecargas, ya que interesa exclusivamente el valor real de la tensión:

Figura 9.5

Axonometría de un forjado de revoltón de rasilla tradicional (Diodato 2009)



| | | |
|-----------------------------|--|-----------|
| Cargas Constructivas | Peso Propio viga: | |
| | 0,22 m · 0,30 m · 410 kg/m ³ (C22) = 27,06 kg/m | 0,27 kN/m |
| | Peso Propio elementos constructivos: | |
| | Forjado tradicional viguetas madera + revoltón de rasillas 1,00 kN/m ² | 1,50 kN/m |
| | Cerramiento patio (ladrillo macizo e= 0,11 m) | 3,00 kN/m |
| Total | 4,77 kN/m | |

Resultados

La tensión real en la viga, sin tener en cuenta, la sobrecarga de uso ni mayoraciones de cálculo, solamente el peso real de la construcción se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_y = \frac{M}{W}$$

Siendo:

M Momento flector máximo en el centro del vano:

$$M = ql^2/8 = 4,77 \text{ kN/m} \cdot (4,30 \text{ m})^2 / 8 = 11,02 \text{ kN}\cdot\text{m} = 1102 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

W Módulo de Resistencia de la sección transversal de la viga:

$$W = b \cdot h^2 / 6 = 3300 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_y = 1102 \text{ kN}\cdot\text{cm} / 3300 \text{ cm}^3 = 0,3339 \text{ kN/cm}^2 = 3,34 \text{ N/mm}^2 = 3,34 \text{ MPa}$$

La tensión mediante el cálculo de las cargas constructivas es 3,34 MPa, en comparación con los 3,17 MPa que resultan de la medición por Hole Drilling. La diferencia, en valores absolutos entre las dos mediciones es de 0,17 MPa, lo que supone un error 5 %.

Discusión

La estructura del forjado responde a una construcción tradicional, es decir de viguetas de madera y revoltón de rasilla cerámica. No se tiene en cuenta la carga hipotética de uso ni ningún coeficiente de seguridad ni mayoración. Simplemente interesa realizar una comparación entre la tensión real (derivada de la carga real) y la tensión obtenida mediante Hole Drilling.

9.2 Ejemplo II: Vivienda Mezkiritz (Navarra)

Descripción de la situación

El segundo ejemplo de aplicación de la técnica de Hole Drilling en una estructura real se llevó a cabo en una vivienda situada en Mezkiritz, un pueblo situado en el Valle de Erro, al Noreste de la Comunidad Foral de Navarra (Figura 9.6).

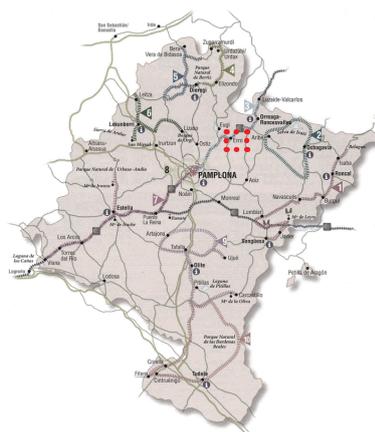


Figura 9.6

A la izquierda, vista general del municipio de Mezkiritz y a la derecha, ubicación del Valle de Erro en la geografía navarra

En este caso se trata de un antiguo caserón de finales del s. XIX (Figura 9.7) y rehabilitado a finales del s. XX, donde las viguetas originales de los forjados han sido sustituidas por viguetas nuevas de pino radiata D. Don. En esta ocasión no se trata solamente de un ensayo de comprobación de los datos recogidos en el laboratorio, sino que en este caso los propietarios dudaban de la capacidad portante de una parte del forjado donde se había dispuesto un mueble de biblioteca muy pesado (Figura 9.8).



Figura 9.7

Vista de la fachada principal de la vivienda objeto de estudio

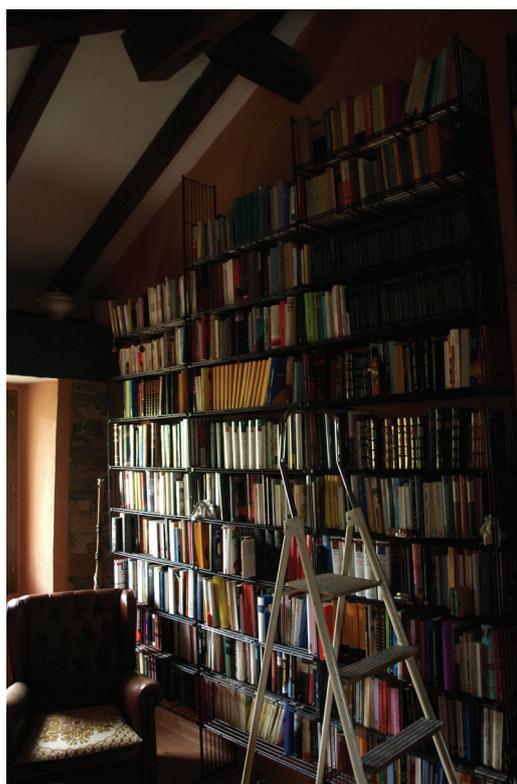


Figura 9.8

Mueble de biblioteca cargando sobre el forjado de viguetas de pino radiata D. Don



Figura 9.9

Vista desde el piso inferior del forjado renovado objeto de estudio

Los forjados fueron renovados completamente en la rehabilitación de los años 90 (Figura 9.9). La librería del piso superior carga directamente y de forma lineal sobre una de las viguetas de esta parte de forjado, pero según los planos, En la obra de rehabilitación de la vivienda se añadió una capa de compresión de hormigón de 6 cm que hace que las cargas se distribuyan mejor por todo el forjado y que la carga de la librería se distribuya entre todas las viguetas.

Se va a realizar la comprobación repartiendo la carga de la biblioteca por toda la superficie que corresponde a esta parte del forjado. Se va a medir la tensión en la vigueta, que supuestamente carga la mayor parte del peso de la librería (Vigueta2, en la Figura 9.10), mediante el procedimiento de Hole Drilling y compararla con la tensión que se presupone mediante el cálculo convencional y con una vigueta que no está soportando directamente el peso de la estantería (Vigueta6, en la Figura 9.10) para comprobar si la capa de compresión de hormigón realiza correctamente su función.

La habitación en la que se van a realizar los ensayos comprende una superficie útil de algo más de 16 m², cubiertos por un forjado compuesto por 7 viguetas de entre 432 y 470 cm de longitud. Todas las viguetas se apoyan sobre uno de los muros de carga de fachada y una viga separada 374 cm de dicho muro. La separación entre viguetas es de 50 cm, por lo que a cada vigueta le corresponde 50 cm de forjado (sombreado en gris sobre la Figura 9.10). La Vigueta2 es la que soporta más directamente el peso del mueble y la Vigueta6, a 200 cm de distancia, soporta el peso indirectamente.

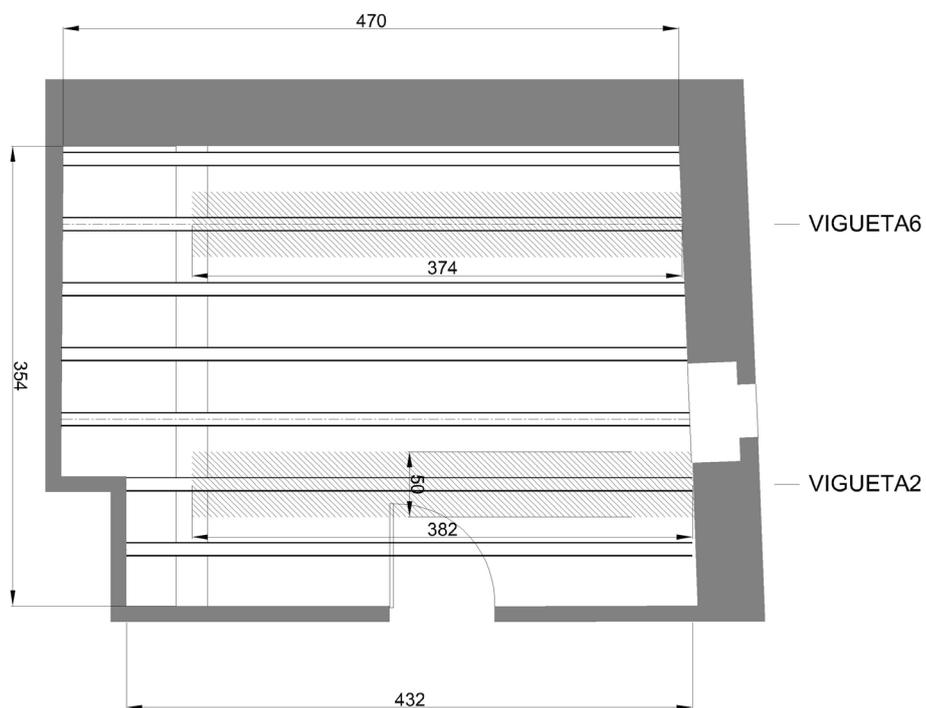


Figura 9.10

Esquema de la parte de forjado que está soportando el mueble de biblioteca

Desde el piso inferior, en una de las habitaciones, se puede acceder a las viguetas que están soportando la librería sin grandes dificultades, ya que están a la vista y no bajo un falso techo (Figura 9.11).



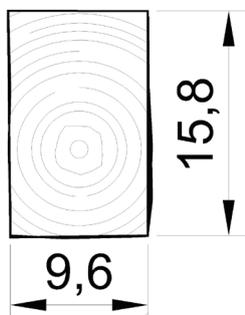
Figura 9.11

Forjado de viguetas visto de la planta inferior. Se indican las viguetas en la que se van a realizar las mediciones por Hole Drilling

Se procede a realizar el estudio por partes, primero la Vigueta 2 y a continuación la Vigueta 6.

9.2.1 Ensayo en la Vigueta 2

Datos Vigueta 2



Dimensiones vigueta:

$$h = 15,8 \text{ cm} \quad b = 9,6 \text{ cm} \quad L = 382 \text{ cm}$$

Humedad:

$$H_r = 14,5 \%$$

Inercia de la sección transversal:

$$I = b \cdot h^3 / 12 = 3155,45 \text{ cm}^4$$

Distancia entre la Línea Neutra y el punto de Hole Drilling:

$$d = h/2 = 7,9 \text{ cm}$$

Módulo Resistente de la sección transversal:

$$W = I/d = b \cdot h^2 / 6 = 399,42 \text{ cm}^3$$

Cálculo de tensiones mediante la técnica de Hole Drilling

Se realiza la operación de Hole Drilling tras haber preparado correctamente la superficie en el centro del vano y haber realizado las conexiones pertinentes. Se recogen los siguientes datos de deformación en las proximidades de la perforación (Figura 9.12):

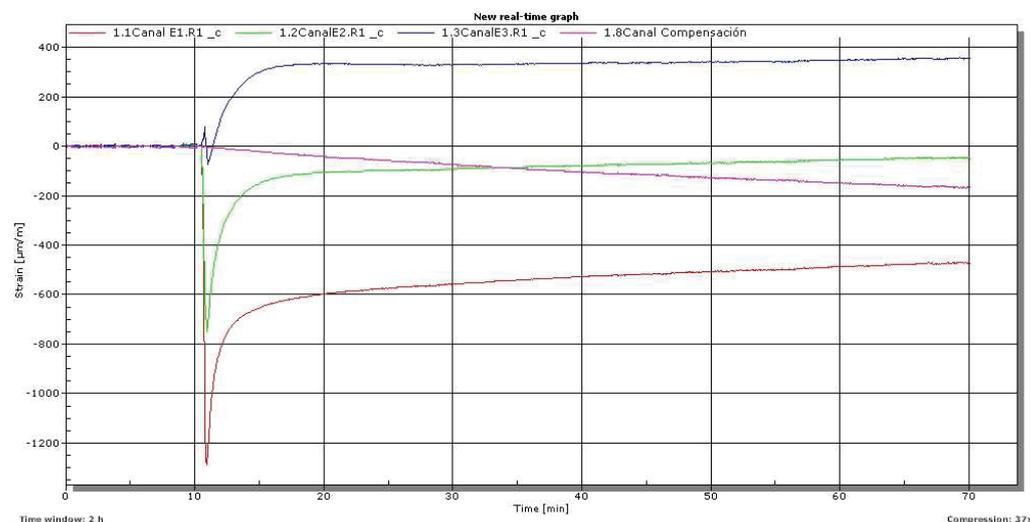


Figura 9.12

Resultados deformaciones tras la realización del Hole Drilling en la Vigueta 2 del Ejemplo II

Los resultados finalmente registrados por las bandas de extensométricas en el minuto 70 del ensayo tras realizar el orificio son los siguientes (Canal de compensación= -167 $\mu\text{m/m}$):

$$\varepsilon_1 = -470 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_2 = -46 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_3 = 354 \mu\text{m/m}$$

En este caso, debido a las dimensiones más reducidas de la sección transversal, la posibilidad de que el plano ensayado sea tangencial no es tan alta. Sin embargo no resulta sencillo adivinar la condición geométrica del plano y se opta por la hipótesis de que se trata de un plano tangencial o casi-tangencial:

$$C_{PRflex.tan} = \begin{pmatrix} -0,209 & 0 & 0,168 \\ -0,027 & 0,675 & -0,343 \\ 0,164 & 0 & -0,766 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} E_y = 7404 \text{ MPa} \\ E_x = 563 \text{ MPa} \end{matrix}$$

Resolviendo la ecuación matricial, pasando la matriz de *compliance* al otro miembro mediante el cálculo de la inversa, se obtienen los siguientes resultados de tensión en la Vigueta 2:

$$\sigma_y = 4,63 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = 0,07 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = 0,05 \text{ MPa}$$

Cálculo peso real de la construcción

La tensión que interesa es existente en la dirección paralela a las fibras, σ_y . Siendo ese el valor obtenido mediante las ecuaciones de Hole Drilling tanto en la Vigueta 2 como en la Vigueta 6, se compara con la tensión real existente en cada una de esas viguetas.

La tensión real en las viguetas depende de las cargas aplicadas y de la geometría de la estructura. La tensión depende del momento flector en el punto donde se realice el ensayo y de la geometría de la sección transversal (Módulo resistente de la sección transversal). Interesa el peso real de la construcción sin mayoraciones ni sobrecargas, por lo que únicamente se contabilizarán el peso propio de la vigueta en cada caso, el peso del forjado y el peso de la librería, que puede considerarse una carga permanente. Se ha calculado también el peso que supone la estantería de libros:

Peso específico de los libros apilados:

850 kg/m³ aprox.

Volumen de la estantería:

235 cm x 22 cm x 200 cm = 1034000 cm³ = 1,034 m³

Peso total:

850 kg/m³ · 1,034 m³ = 879 kg (8,8 kN)

La densidad media de la madera es 410 kg/m³, al tratarse de pino radiata D. Don de gruesa escuadría. Se consideran los siguientes pesos y cargas sobre la viga objeto de estudio.

| | | | |
|---------------------------------------|---|------------------------|------------------|
| Cargas Constructivas Vigüeta 2 | Peso Propio Vigüeta 2: | | |
| | 0,096 m · 0,158 m · 410 kg/m ³ (C22) = 6,22 kg/m | | 0,06 kN/m |
| | Peso Propio elementos constructivos: | | |
| | Forjado tradicional vigüetas madera + rasilla | 1,00 kN/m ² | 0,50 kN/m |
| | Capa de compresión de hormigón (25 kN/m ³ en e= 0,06m) | 1,50 kN/m ² | 0,75 kN/m |
| | Sobrecarga librería: | | |
| | La carga de libros en la estantería es de 8,8 kN. | | |
| | La superficie de esta parte del forjado es 13,50 m ² | 0,65 kN/m ² | 0,33 kN/m |
| | Total | | 1,64 kN/m |

Resultados

La tensión real en la vigüeta, sin tener en cuenta la sobrecarga de uso ni mayoraciones de cálculo, solamente el peso real de la construcción se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_y = \frac{M}{W}$$

Siendo:

M Momento flector máximo en el centro del vano:

$$M = ql^2/8 = 1,64 \text{ kN/m} \cdot (3,82 \text{ m})^2 / 8 = 2,99 \text{ kN}\cdot\text{m} = 299 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

W Módulo de Resistencia de la sección transversal de la vigüeta:

$$W = b \cdot h^2 / 6 = 399,42 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_y = 299 \text{ kN}\cdot\text{cm} / 399,42 \text{ cm}^3 = 0,75 \text{ kN/cm}^2 = 0,749 \text{ N/mm}^2 = 7,49 \text{ MPa}$$

La tensión mediante el cálculo de las cargas constructivas es 7,49 MPa, en comparación con los 4,63 MPa que resultaban de la medición por Hole Drilling. La diferencia, en valores absolutos entre las dos mediciones es de 2,86 MPa, lo que supone un error 38%.

Discusión

Es un error alto, puede ser que la medición de las deformaciones no haya sido correcta. Llama la atención el descenso radical del canal de compensación (en rosa en el gráfico de la Figura 9.12). Ese descenso radical es debido a

una corriente de aire producida durante el ensayo al abrir la ventana de la habitación donde se estaba realizando el ensayo. Se va a realizar el cálculo sin restar la medida del canal de compensación. El canal de compensación marcaba $-167 \mu\text{m/m}$ en el último momento:

$$\varepsilon_1 = -470 + (-167) \mu\text{m/m} = -637 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_2 = -46 + (-167) \mu\text{m/m} = -213 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_3 = 354 + (-167) \mu\text{m/m} = 187 \mu\text{m/m}$$

Las nuevas tensiones calculadas mediante la formulación de Hole Drilling son las siguientes:

$$\sigma_y = 7,03 \text{ MPa}$$

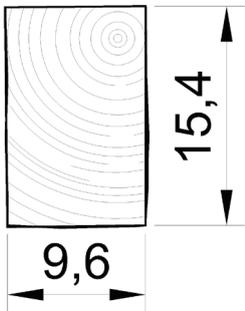
$$\tau_{xy} = 0,15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = 1,01 \text{ MPa}$$

La tensión mediante el cálculo de las cargas constructivas es $7,49 \text{ MPa}$, en comparación con los $7,03 \text{ MPa}$ que resultan de la medición por Hole Drilling sin tener en cuenta la compensación. La diferencia, en valores absolutos entre las dos mediciones es de $0,46 \text{ MPa}$, lo que supone un error 6% .

9.2.2 Ensayo en la Vigueta 6

Datos Vigueta 6



Dimensiones vigueta:

$$h = 15,4 \text{ cm} \quad b = 9,6 \text{ cm} \quad L = 374 \text{ cm}$$

Humedad:

$$H_r = 14,5 \%$$

Inercia de la sección transversal:

$$I = b \cdot h^3 / 12 = 2921,80 \text{ cm}^4$$

Distancia entre la Línea Neutra y el punto de Hole Drilling:

$$d = h/2 = 7,7 \text{ cm}$$

Módulo Resistente de la sección transversal:

$$W = I/d = b \cdot h^2 / 6 = 379,45 \text{ cm}^3$$

Cálculo de tensiones mediante la técnica de Hole Drilling

Se realiza la operación de Hole Drilling tras haber preparado correctamente la superficie en el centro del vano y haber realizado las conexiones pertinentes. Se recogen los siguientes datos de deformación en las proximidades de la perforación (Figura 9.13):

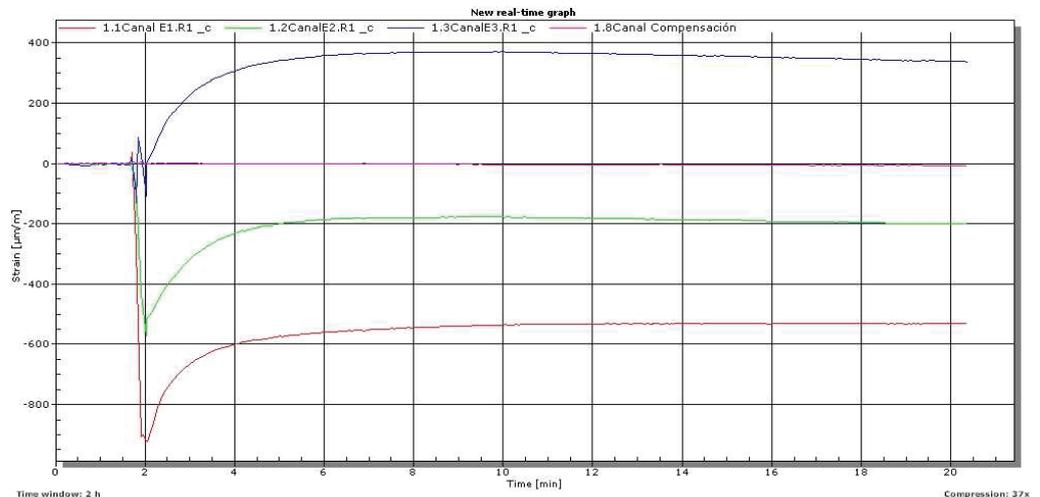


Figura 9.13

Resultados deformaciones tras la realización del Hole Drilling en la Vigueta 6 del Ejemplo II

Las galgas extensométricas se han estabilizado muy rápidamente en su deformación definitiva. Los resultados finales registrados por las galgas en el minuto 20 del ensayo tras realizar el orificio son los siguientes (Canal de compensación = $-6 \mu\text{m/m}$):

$$\epsilon_1 = -532 \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_2 = -201 \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_3 = 336 \mu\text{m/m}$$

Resultados

La tensión real en la vigueta, sin tener en cuenta, la sobrecarga de uso ni mayoraciones de cálculo, solamente el peso real de la construcción se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_y = \frac{M}{W}$$

Siendo:

M Momento flector máximo en el centro del vano:

$$M = ql^2/8 = 1,64 \text{ kN/m} \cdot (3,74 \text{ m})^2 / 8 = 2,87 \text{ kN}\cdot\text{m} = 287 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

W Módulo de Resistencia de la sección transversal de la vigueta:

$$W = b \cdot h^2 / 6 = 379,45 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_y = 287 \text{ kN}\cdot\text{cm} / 379,45 \text{ cm}^3 = 0,74 \text{ kN/cm}^2 = 0,743 \text{ N/mm}^2 = 7,56 \text{ MPa}$$

La tensión mediante el cálculo de las cargas constructivas es 7,56 MPa, en comparación con los 5,41 MPa que resultaban de la medición por Hole Drilling. La diferencia, en valores absolutos entre las dos mediciones es de 2,15 MPa, lo que supone un error 28%.

Discusión

La capa de compresión hace que todas las viguetas trabajen conjuntamente y que la Vigueta 2 no sufra por sí sola la sobrecarga de la librería, quedando tranquilos los propietarios de la vivienda.

En el ensayo de la Vigueta 2 la banda de compensación dio una medida anómala debido a una corriente de aire al abrir la ventana durante el ensayo y no se resta ese valor a las deformaciones por Hole Drilling.

Por otro lado, analizando visualmente la Vigueta 6 tras no estar totalmente conforme con los resultados obtenidos, se descubren indicios de que el plano en el que se ha realizado es intermedio y no tangencial (Ver Capítulo 10). Se procede a calcular la diferencia entre las tensiones, realizando el cálculo con la matriz de *compliance* primera y los módulos elásticos primeros:

$$C_{PRflex} = \begin{pmatrix} -0,198 & 0 & 0,310 \\ -0,001 & 0,955 & -0,206 \\ 0,206 & 0 & -0,749 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} E_y = 8231 \text{ MPa} \\ E_x = 605 \text{ MPa} \end{matrix}$$

Los valores recogidos tras la perforación de Hole Drilling, se recuerda, eran los siguientes:

$$\varepsilon_1 = -532 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_2 = -201 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_3 = 336 \mu\text{m/m}$$

En esta ocasión el canal de compensación apenas ha sufrido variación, dando una deformación de $-6 \mu\text{m/m}$, correspondiente al propio calentamiento de las bandas por el paso de la corriente. Resolviendo la ecuación matricial de Hole Drilling, se obtienen los siguientes nuevos resultados de tensión:

$$\sigma_y = 7,78 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = -0,22 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = 1,14 \text{ MPa}$$

La tensión obtenida con la matriz general de compliance para el caso de flexión, con sus respectivos módulos elásticos, ajusta casi a la perfección con las cargas reales de construcción. Se recuerda que el valor de la tensión por las cargas constructivas era $7,56 \text{ MPa}$, frente a los $7,78 \text{ MPa}$ obtenidos por Hole Drilling, supone una diferencia de $0,22 \text{ MPa}$ y un error absoluto del 3%.

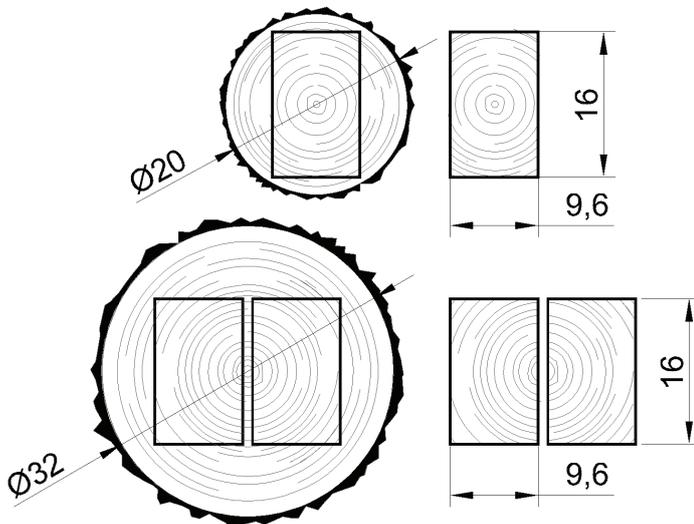


Figura 9.14

Extracción de las viguetas de la vivienda en Mezkiritz en función del tronco de procedencia y la influencia en la configuración de los planos

*Es posible que la respuesta a esta cuestión esté en la Figura 9.14: la extracción o el aserrado de las piezas estructurales se ve muy influenciada por el diámetro del árbol del que sea extraída. En este caso, en la Vigueta2 el ensayo se ha realizado en un plano más bien tangencial mientras que el ensayo realizado en la Vigueta6 ha sido realizado sobre un plano intermedio. Queda patente, que en el caso de tener la certeza de que se trata de un plano tangencial debe utilizarse la segunda matriz de compliance, pero que en el resto, es más recomendable utilizar la primera matriz general.

9.3 Ejemplo III: Vivienda en Tolosa (Gipuzkoa)

Descripción de la situación

Tolosa es un municipio de Gipuzkoa, situado en el valle del río Oria (Figura 9.15). El tercer edificio objeto de estudio es una vivienda en el barrio de San Esteban, a las afueras del municipio, en la que se realizaron obras de renovación de la cubierta el pasado verano (Figura 9.16).



Figura 9.15

A la izquierda, ubicación del edificio en el plano de Tolosa y, a la derecha, Tolosa en provincia de Gipuzkoa



Figura 9.16

Vista de la vivienda en la que se va a proceder a medir la tensión en una viga de la cubierta

La cubierta de este edificio fue totalmente renovada en el verano de 2015 por la arquitecta Ainara Martínez de Albéniz. La nueva estructura es de pino radiata D. Don, procedente del sur de Francia. Una de las vigas presenta una fenda, abierta recientemente y que asusta a los propietarios, durante el proceso de secado (Figura 9.17). Según la arquitecta la fenda se debe a haber recibido la madera todavía húmeda, pero que no representa un peligro estructural y que puede que ni siguiera afecte a la capacidad resistente de la pieza. Se procede a realizar una medición de Hole Drilling para comprobar si la fenda afecta al estado tensional de la viga o no.

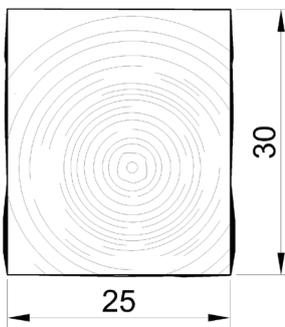


Figura 9.17

Roseta conectada en una de las vigas de la cubierta del edificio

Datos

Viga de cubierta



Dimensiones viga:

$h = 30 \text{ cm}$ $b = 25 \text{ cm}$ $L = 500 \text{ cm}$

Humedad:

$H_r = 14,0 \%$

Inercia de la sección transversal:

$I = b \cdot h^3 / 12 = 56250 \text{ cm}^4$

Distancia entre la Línea Neutra y el punto de Hole Drilling:

$d = h/2 = 15 \text{ cm}$

Módulo Resistente de la sección transversal:

$W = I/d = b \cdot h^2 / 6 = 3750 \text{ cm}^3$

Cálculo de tensiones mediante la técnica de Hole Drilling

Se realiza la operación de Hole Drilling tras haber preparado correctamente la superficie en el centro del vano y haber realizado las conexiones pertinentes. Se recogen los siguientes datos de deformación en las proximidades de la perforación (Figura 9.18):

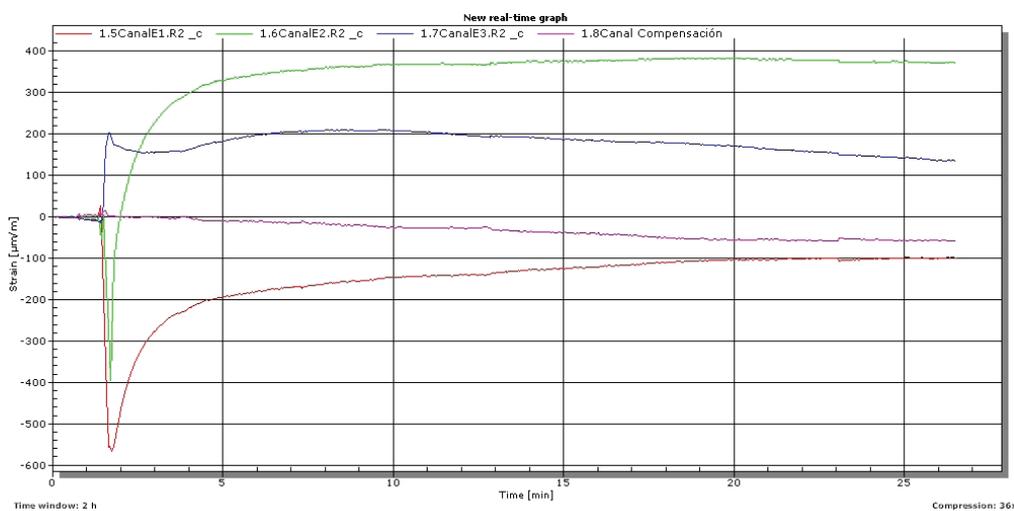


Figura 9.18

Resultados deformaciones tras la realización del Hole Drilling en la viga de cubierta del Caso III

Los resultados finalmente registrados por las bandas de extensométricas en el minuto 27 del ensayo tras realizar el orificio son los siguientes (Canal de compensación= -58 $\mu\text{m/m}$):

$$\varepsilon_1 = -97 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_2 = 372 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_3 = 134 \mu\text{m/m}$$

Al tratarse de una viga de tan grandes dimensiones, se toma la hipótesis de que el plano sobre el que se va a realizar el ensayo es tangencial o casi-tangencial. Por tanto se han tomado los valores de la matriz de *compliance* para el caso de realizar la operación de Hole Drilling en un plano tangencial con sus respectivos valores de los módulos elásticos:

$$C_{PR/flex.tan} = \begin{pmatrix} -0,209 & 0 & 0,168 \\ -0,027 & 0,675 & -0,343 \\ 0,164 & 0 & -0,766 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} E_y = 7404 \text{ MPa} \\ E_x = 563 \text{ MPa} \end{matrix}$$

Resolviendo la ecuación matricial, pasando la matriz de *compliance* al otro miembro mediante el cálculo de la inversa, se obtienen los siguientes resultados de tensión:

$$\sigma_y = 0,80 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = 1,06 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = -0,19 \text{ MPa}$$

Cálculo del peso real de la construcción

En este caso la tensión que interesa es la paralela a la dirección de las fibras, $\sigma_y = 1,63 \text{ MPa}$ mediante la formulación de Hole Drilling. Siendo ese el valor obtenido mediante las ecuaciones de Hole Drilling se compara con la carga real existente en la viga. Se ha medido la geometría de la viga, longitud y sección transversal para calcular el momento flector derivado de la carga uniformemente distribuida que le corresponde a la cubierta. La arquitecta ha proporcionado los datos de los materiales para el cálculo del peso real de la construcción. La madera corresponde a una clase resistente C18, según los planos de la arquitecta, cuya densidad media es 380 kg/m^3 .

Peso Propio viga:

0,25 m · 0,30 m · 380 kg/m³ (C18) = 28,2 kg/m

0,29 kN/m

Peso Propio elementos constructivos:

Correas de madera (10 cm x 16 cm) + Tablero (e= 2,5 cm)

0,50 kN/m²

1,00 kN/m

Teja curva corriente (2 kg/ pieza)

0,50 kN/m²

1,00 kN/m

Aislante lana de roca

0,02 kN/m²

0,04 kN/m

Total

2,33 kN/m

Cargas

Constructivas

Resultados

La tensión real en la viga, sin tener en cuenta la sobrecarga de uso ni mayoraciones de cálculo, solamente el peso real de la construcción se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_y = \frac{M}{W}$$

Siendo:

M Momento flector máximo en el centro del vano:

$$M = ql^2/8 = 2,33 \text{ kN/m} \cdot (5,00 \text{ m})^2 / 8 = 7,28 \text{ kN}\cdot\text{m} = 728 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

W Módulo de Resistencia de la sección transversal de la viga:

$$W = b \cdot h^2 / 6 = 3750 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_y = 728 \text{ kN}\cdot\text{cm} / 3750 \text{ cm}^3 = 0,1941 \text{ kN/cm}^2 = 1,94 \text{ N/mm}^2 = 1,94 \text{ MPa}$$

La tensión mediante el cálculo de las cargas constructivas es 1,94 MPa, en comparación con los 0,80 MPa que resultan de la medición por Hole Drilling. La diferencia, en valores absolutos entre las dos mediciones es de 1,14 MPa, lo que supone un error 59 %.

Discusión

Como ocurrió en el caso de Merkiritz, el bloque donde está ubicada la banda que recoge las alteraciones ha dado resultados anormales. Es decir, no resta solamente las deformaciones debidas al calentamiento propio de las bandas por el paso de una intensidad eléctrica, sino que está recogiendo deformaciones exageradas, que pueden ser debidas a una corriente de aire que afecta a ese bloque donde se ha colocado la banda de compensación pero no a la viga

donde se ha realizado en ensayo de Hole Drilling. La banda de compensación está ubicada en un bloque de la misma madera pero exento y apoyado en el suelo.

Se procede a realizar el cálculo. Esta vez sin restar la medida del canal de compensación, que registraba una medida de $-58 \mu\text{m/m}$ en el último momento:

$$\epsilon_1 = -97 + (-58) \mu\text{m/m} = -155 \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_2 = 372 + (-58) \mu\text{m/m} = 314 \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_3 = 134 + (-58) \mu\text{m/m} = 76 \mu\text{m/m}$$

Las nuevas tensiones calculadas mediante la formulación de Hole Drilling son las siguientes:

$$\sigma_y = 1,63 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = 1,09 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = 0,15 \text{ MPa}$$

La tensión mediante el cálculo de las cargas constructivas es $1,94 \text{ MPa}$, en comparación con los $1,63 \text{ MPa}$ que resultan de la medición por Hole Drilling sin tener en cuenta la compensación. La diferencia, en valores absolutos entre las dos mediciones es de $0,31 \text{ MPa}$, lo que supone un error 16% .

9.4 Ejemplo IV: Vivienda en el Monte Ulía en Donostia-San Sebastián (Gipuzkoa)

Descripción de la situación

El monte Ulía delimita geográficamente la expansión de Donostia-San Sebastián hacia el Este. Este monte supone una frontera natural entre la capital gipuzkoana y el colindante municipio de Pasajes. En su ladera, se encuentra este cuarto ejemplo de aplicación de la técnica de Hole Drilling en estructuras reales (Figura 9.19). Se trata de un edificio en desuso, que en hace años funcionó como merendero, pero que hoy en día puede considerarse abandonado. Los propietarios han requerido realizar una inspección del estado actual y plantear un nuevo uso en el futuro (Figura 9.20).



Figura 9.19
Situación del caso analizado
en la ladera del monte Ulía



Figura 9.20
Vista del edificio objeto de
estudio

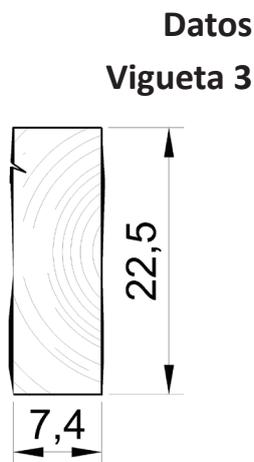


Figura 9.21

Forjado de viguetas visto de la planta baja. Se indica las viguetas en las que se van a realizar la mediciones

Se ha procedido a la realización de un ensayo de Hole Drilling en dos viguetas de un mismo forjado entre la planta baja y la primera. Se trata de una parte del forjado que fue renovado en una de las medidas parciales de reparación. Es un forjado muy simple de viguetas y una capa de compresión de hormigón, que no se sabe si será posible mantener o tendrá que demolerse y volverse a construir con el resto de los forjados. La separación intenejes de las viguetas que forman esta parte del forjado es de 65 cm. Se van a analizar dos viguetas (Vigueta3 y Vigueta5), similares al menos geoméricamente, para comprobar que las tensiones captadas por las galgas son iguales o similares (Figura 9.21).

9.4.1 Ensayo en la Vigueta 3



Dimensiones vigueta:

$h = 22,5 \text{ cm}$ $b = 7,4 \text{ cm}$ $L = 343 \text{ cm}$

Humedad:

$H_r = 12,0 \%$

Inercia de la sección transversal:

$I = b \cdot h^3 / 12 = 7024,22 \text{ cm}^4$

Distancia entre la Línea Neutra y el punto de Hole Drilling:

$d = h / 2 = 11,25 \text{ cm}$

Módulo Resistente de la sección transversal:

$W = I / d = b \cdot h^2 / 6 = 624,38 \text{ cm}^3$

Cálculo de tensiones mediante la técnica de Hole Drilling

Se realiza la operación de Hole Drilling tras haber preparado correctamente la superficie en el centro del vano y haber realizado las conexiones pertinentes. Se recogen los siguientes datos de deformación en las proximidades de la perforación (Figura 9.22):

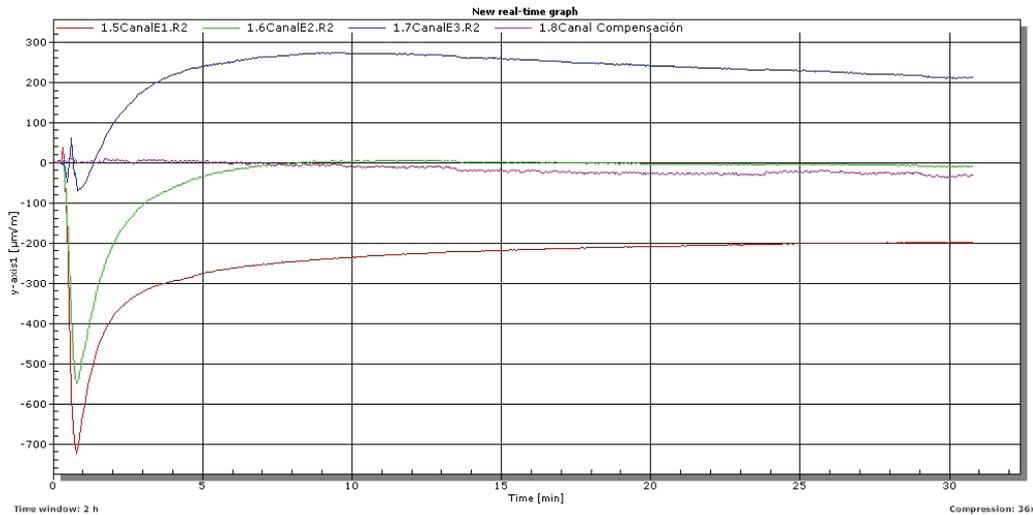


Figura 9.22
Resultados deformaciones tras la realización del Hole Drilling en la Vigüeta 3 del Ejemplo IV

Los resultados finalmente registrados por las bandas de extensométricas en el minuto 30 del ensayo tras realizar el orificio son los siguientes (Canal de compensación= -31 µm/m):

$$\epsilon_1 = -198 \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_2 = -9 \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_3 = 210 \mu\text{m/m}$$

Se toma el valor de la matriz de compliance obtenida en el laboratorio para elementos sometidos a flexión, donde la cara donde se va a proceder a realizar el Hole Drilling responda a un plano intermedio (no tangencial) y sus correspondientes módulos de elasticidad. Son vigüetas de gran canto ($h= 22,5$ cm) pero estrechas ($b= 7,4$ cm), lo que hace que los planos que corresponden a las caras inferiores, las de máxima flexión sean mayoritariamente intermedias y no tangenciales:

$$C_{PRflex} = \begin{pmatrix} -0,198 & 0 & 0,310 \\ -0,001 & 0,955 & -0,206 \\ 0,206 & 0 & -0,749 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} E_y = 8231\text{MPa} \\ E_x = 605\text{MPa} \end{matrix}$$

Resolviendo la ecuación matricial, pasando la matriz de *compliance* al otro miembro mediante el cálculo de la inversa, se obtienen los siguientes resultados de tensión en la Vigüeta 3:

$$\sigma_y = 2,14 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = -0,03 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = -0,04 \text{ MPa}$$

Cálculo del peso real de la construcción

En este caso la tensión que interesa es la paralela a la dirección de las fibras, $\sigma_y = 2,14 \text{ MPa}$ mediante la formulación de Hole Drilling. Siendo ese el valor obtenido mediante las ecuaciones de Hole Drilling se compara con la carga real existente en la viga. Se mide la geometría de la viga, longitud y sección transversal para calcular el momento flector derivado de la carga uniformemente distribuida que le corresponde del forjado. Las viguetas corresponden a la clase resistente C22.

| | | | |
|---------------------------------------|---|--|------------------|
| Cargas Constructivas Vigüeta 3 | Peso Propio Vigüeta 3: | | |
| | | $0,074 \text{ m} \cdot 0,225 \text{ m} \cdot 410 \text{ kg/m}^3 \text{ (C22)} = 6,83 \text{ kg/m}$ | 0,07 kN/m |
| | Peso Propio elementos constructivos: | | |
| | Tablero de madera (e= 2,5 cm) | 0,50 kN/m ² | 0,33 kN/m |
| | Capa de compresión de hormigón (25 kN/m ³ en e= 0,06m) | 1,50 kN/m ² | 0,98 kN/m |
| | Total | | 1,38 kN/m |

Resultados

La tensión real en la vigüeta, sin tener en cuenta la sobrecarga de uso ni mayoraciones de cálculo, solamente el peso real de la construcción se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_y = \frac{M}{W}$$

Siendo:

M Momento flector máximo en el centro del vano:

$$M = ql^2/8 = 1,38 \text{ kN/m} \cdot (3,43 \text{ m})^2 / 8 = 2,03 \text{ kN}\cdot\text{m} = 203 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

W Módulo de Resistencia de la sección transversal de la vigüeta:

$$W = b \cdot h^2 / 6 = 624,38 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_y = 203 \text{ kN}\cdot\text{cm} / 624,38 \text{ cm}^3 = 0,3250 \text{ kN/cm}^2 = 3,25 \text{ N/mm}^2 = 3,25 \text{ MPa}$$

La tensión mediante el cálculo de las cargas constructivas es 3,25 MPa, en comparación con los 2,14 MPa que resultaban de la medición por Hole Drilling. La diferencia, en valores absolutos entre las dos mediciones es de 1,11 MPa, lo que supone un error 34%.

Discusión

Es un error alto, es posible que la medición de las deformaciones no haya sido correcta. Se opta por no restar el valor de la compensación (Canal de compensación= -31 $\mu\text{m}/\text{m}$), de modo que las deformaciones resultantes son las siguientes en el momento final del ensayo:

$$\epsilon_1 = -198 + (-31) \mu\text{m}/\text{m} = -229 \mu\text{m}/\text{m}$$

$$\epsilon_2 = -9 + (-31) \mu\text{m}/\text{m} = -40 \mu\text{m}/\text{m}$$

$$\epsilon_3 = 210 + (-31) \mu\text{m}/\text{m} = 179 \mu\text{m}/\text{m}$$

Las nuevas tensiones calculadas mediante la formulación de Hole Drilling son las siguientes:

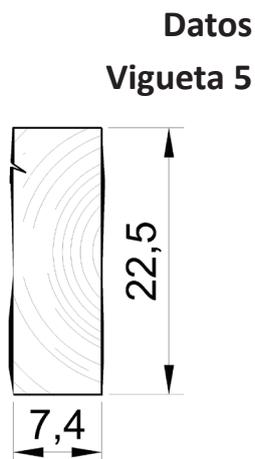
$$\sigma_y = 2,95 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = -0,01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = 0,23 \text{ MPa}$$

La tensión mediante el cálculo de las cargas constructivas es 3,25 MPa, en comparación con los 2,95 MPa que resultan de la medición por Hole Drilling sin tener en cuenta la compensación. La diferencia, en valores absolutos entre las dos mediciones es de 0,30 MPa, lo que supone un error 9%.

9.4.2 Ensayo en la Vigueta 5



Dimensiones vigueta:

$h = 22,5 \text{ cm}$ $b = 7,4 \text{ cm}$ $L = 343 \text{ cm}$

Humedad:

$H_r = 12,0 \%$

Inercia de la sección transversal:

$I = b \cdot h^3 / 12 = 7024,22 \text{ cm}^4$

Distancia entre la Línea Neutra y el punto de Hole Drilling:

$d = h/2 = 11,25 \text{ cm}$

Módulo Resistente de la sección transversal:

$W = I/d = b \cdot h^2 / 6 = 624,38 \text{ cm}^3$

Cálculo de tensiones mediante la técnica de Hole Drilling

Se realiza la operación de Hole Drilling tras haber preparado correctamente la superficie en el centro del vano y haber realizado las conexiones pertinentes. Se recogen los siguientes datos de deformación en las proximidades de la perforación (Figura 9.23):

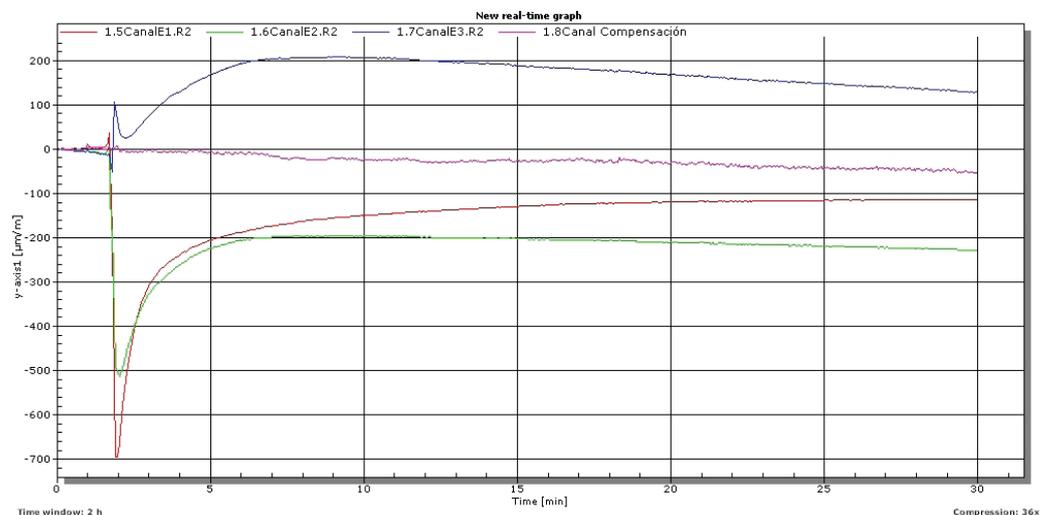


Figura 9.23

Resultados deformaciones tras la realización del Hole Drilling en la Vigueta 5 del Ejemplo IV

Los resultados finalmente registrados por las bandas de extensométricas en el minuto 30 del ensayo tras realizar el orificio son los siguientes (Canal de compensación= -53 µm/m):

$\epsilon_1 = -114 \text{ µm/m}$

$\epsilon_2 = -228 \text{ µm/m}$

$\epsilon_3 = 127 \text{ µm/m}$

$$\sigma_y = \frac{M}{W}$$

Siendo:

M Momento flector máximo en el centro del vano:

$$M = ql^2/8 = 1,38 \text{ kN/m} \cdot (3,43 \text{ m})^2 / 8 = 2,03 \text{ kN}\cdot\text{m} = 203 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

W Módulo de Resistencia de la sección transversal de la vigueta:

$$W = b \cdot h^2 / 6 = 624,38 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_y = 203 \text{ kN}\cdot\text{cm} / 624,38 \text{ cm}^3 = 0,3250 \text{ kN/cm}^2 = 3,25 \text{ N/mm}^2 = 3,25 \text{ MPa}$$

La tensión mediante el cálculo de las cargas constructivas es 3,25 MPa, en comparación con los 1,22 MPa que resultaban de la medición por Hole Drilling. La diferencia, en valores absolutos entre las dos mediciones es de 2,03 MPa, lo que supone un error 62%.

Discusión

Es un error muy alto, nuevamente la medición de las deformaciones no ha sido correcta debido a un elevado registro del valor de la compensación (Canal de compensación= -53 $\mu\text{m/m}$). Se vuelve a realizar el cálculo sin tener en cuenta el canal de compensación:

$$\epsilon_1 = -114 + (-53) \mu\text{m/m} = -167 \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_2 = -228 + (-56) \mu\text{m/m} = -281 \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_3 = 127 + (-53) \mu\text{m/m} = 74 \mu\text{m/m}$$

Las nuevas tensiones calculadas mediante la formulación de Hole Drilling son las siguientes:

$$\sigma_y = 2,70 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = -0,54 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = -0,52 \text{ MPa}$$

La tensión mediante el cálculo de las cargas constructivas es 3,25 MPa, en comparación con los 2,70 MPa que resultan de la medición por Hole Drilling sin tener en cuenta la compensación. La diferencia, en valores absolutos entre las dos mediciones es de 0,55 MPa, lo que supone un error 17%.

Capítulo 10

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

10.1 Conclusiones

Utilidad de la técnica Hole Drilling en la evaluación de estructuras de madera:

Los métodos de relajación de las tensiones en elementos estructurales pueden suponer un pilar fundamental en la evaluación in situ de los edificios existentes y pueden ayudar enormemente en la toma de decisiones en un proyecto de restauración o rehabilitación. Los resultados obtenidos en esta investigación suponen un avance importante en la evaluación in situ de estructuras de madera, ya que por primera vez se tiene un dato real y objetivo acerca del estado de tensiones en los elementos portantes. Ha quedado demostrado que la técnica Hole Drilling puede resultar útil para ser aplicada sobre elementos estructurales de madera, siendo éste un material ortotrópico y complejo, sobre el que se aplica la técnica también por primera vez.

Tabla 10.1

Comparación entre las tensiones reales existentes en los elementos estructurales analizados en los ejemplos de aplicación y las tensiones obtenidas mediante la aplicación de la técnica Hole Drilling

| | Viga PAMPLONA | Vigueta2 MEZKIRITZ | Vigueta6 MEZKIRITZ | Viga Cubierta TOLOSA | Vigueta3 ULÍA | Vigueta5 ULÍA |
|-----------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------|------------------|
| σ_{real}^* (MPa) | 3,34 | 7,49 | 7,56 | 1,94 | 3,25 | 3,25 |
| σ_{HD} (MPa) | 3,17 | 7,03 | 7,78 | 1,63 | 2,95 | 2,70 |
| Diferencia (MPa) | 0,17 | 0,46 | 0,22 | 0,31 | 0,30 | 0,55 |
| Error % | 5 | 6 | 3 | 16 | 9 | 17 |

*NOTA: Calculado analíticamente

Los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral y, más concretamente, en los ejemplos reales de aplicación (Tabla 10.1), son muy satisfactorios y suficientemente relevantes como para asegurar que la técnica puede aplicarse en este material ortotrópico que es la madera. La adaptación realizada a lo largo

de este documento para poder aplicar la técnica Hole Drilling en elementos portantes de madera ha sido adecuada.

La técnica de Hole Drilling debería estar a disposición de todo técnico cualificado que desee hacer una inspección de una estructura de madera. Existen numerosas técnicas de evaluación in situ que han ido desarrollándose y mejorándose durante años pero ninguna capaz de devolver el estado de tensiones interno en un elemento estructural por su capacidad intrínseca de soportar cargas gravitatorias y demás acciones externas. Nos encontramos ante un momento inicial y a la vez crucial de la aplicación de la técnica Hole Drilling en elementos estructurales de madera: la efectividad de la técnica es indiscutible, pero como con las demás técnicas de evaluación y caracterización, es necesario seguir desarrollándola y mejorándola para esta nueva aplicación.

Importancia de distinguir la geometría del plano en el que se realiza el ensayo:

Figura 10.1

Dos viguetas en apoyadas sobre una viga al tresbolillo, permitiendo visualizar la sección transversal. En este caso la cara inferior corresponde a un plano perfectamente tangencial a los anillos de crecimiento. (Ejemplo de Mezkiritz)



La anisotropía de la madera juega un papel decisivo en lo que a la aplicación de la técnica Hole Drilling se refiere pero también la geometría de corte de la pieza. Resulta de vital importancia hacer un análisis visual profundo de la pieza a ensayar para entender en qué situación geométrica se va a realizar la perforación Hole Drilling: tangencial, radial o intermedia. Es indispensable identificar el plano sobre el que se esta trabajando para utilizar una matriz u otra, como se mostró en el Capítulo 9, sin embargo, no resulta siempre fácil .

Si se puede visualizar la testa de la viga, distinguir el tipo de plano de la cara inferior de la viga o vigueta, es directo. Sin embargo, en las estructuras reales, frecuentemente las cabezas de las vigas y viguetas se encuentran empotradas en los muros y resulta imposible acceder a ellas. Si las viguetas que componen un forjado están colocadas al tresbolillo, pueden visualizarse las testas sin problemas (Figura 10.1).

Las vigas y viguetas además de estar empotradas, ocasionalmente, están también embebidas en los forjados. Otras quedan descolgadas del forjado, de modo que tres de las caras quedan a la vista. En ese caso, otra opción es estudiar esas tres caras visibles: si el plano corresponde a un corte radial, la médula quedará a la vista (Figura 10.2). En otras ocasiones, una visualización general del elemento puede dar alguna pista; por ejemplo, si en alguna de las aristas de un elemento estructural, de sección más bien pequeña (ancho

b < 10 cm), se visualizan restos de las corteza del tronco, puede entenderse que no se trata de un plano tangencial sino de uno intermedio y que de un solo tronco se han sacado varias piezas (Figura 10.3).

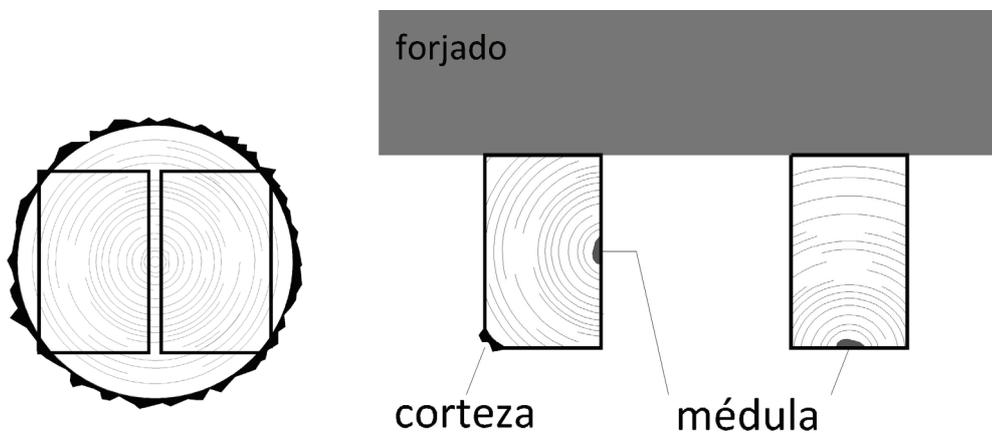


Figura 10.2

Distintas posiciones de la médula y de los anillos de crecimiento definiendo los distintos planos donde se puede realizar la operación de Hole Drilling



Figura 10.3

Restos de la corteza del tronco o de médula en las aristas de algunas viguetas en el ejemplo de Mezkiritz

Una última opción para distinguir el plano en el que se realizó el Hole Drilling, consiste en analizar la huella que deja la técnica en el elemento estudiado. Se distinguen tres opciones:

1. Si tras la perforación, los anillos de crecimiento dibujan un patrón más o menos horizontal con el orificio puede decirse que el ensayo ha sido realizado en un plano tangencial a los anillos de crecimiento (Figura 10.4, izquierda).
2. Si la secuencia de anillos se dibuja con una inclinación, puede entenderse que se trata de un plano más intermedio (Figura 10.4, centro).
3. Si el dibujo de los anillos resultara ser más bien vertical, el caso correspondería a un plano radial (Figura 10.4, derecha).

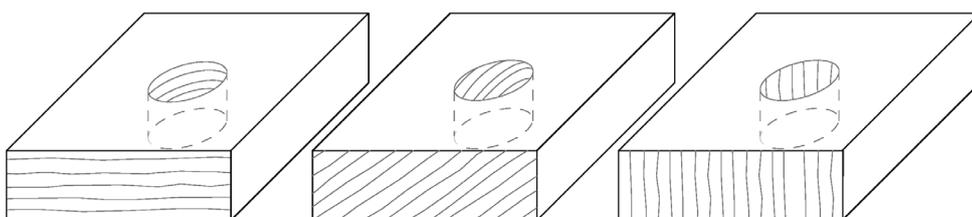


Figura 10.4

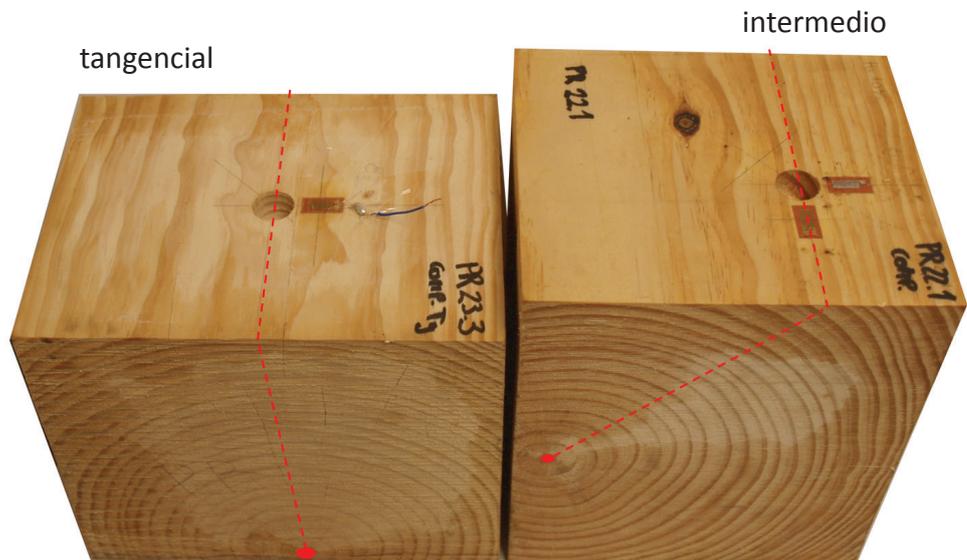
Detalle del dibujo de los anillos de crecimiento en el orificio resultante tras realizar la perforación

Se ha procedido a estudiar con detenimiento dos probetas cuya naturaleza geométrica es distinta: en una la condición de tangencialidad es perfecta,

generándose una huella con anillos paralelos a la superficie. En otras situaciones, los anillos dibujan un patrón más inclinado en la huella tras realizar la perforación (Figura 10.5).

Figura 10.5

Fotografías en dos tacos en donde las perforaciones han sido realizadas en distintas condiciones geométricas; una en punto perfectamente tangencial a los anillos de crecimiento y otra en un punto intermedio



En la Figura 10.6 se muestran en detalle las huellas resultantes de las perforaciones anteriores, respectivamente del orificio realizado en un punto perfectamente tangencial y en otro intermedio.

Figura 10.6

Detalle de la huella tras realizar la perforación en los tacos anteriores; anillos más paralelos a un plano tangencial a los anillos de crecimiento y en un plano intermedio



Carácter singular de la madera:

Efectivamente la madera es un material muy especial por su origen natural y resulta imposible toparse con dos piezas iguales. Cada elemento, igual que cada árbol, tiene sus propias singularidades, nudos, fendas, gemas y demás características propias de crecimiento que le hacen ser diferente que el resto incluso en su comportamiento elástico. En cierta manera, en la ejecución de esta Tesis no se han eludido dichas singularidades tratando de acercarse a la coyuntura real, tanto de las piezas del tamaño estructural como lo encontrado en los edificios existentes, pero sí que ha tenido que elegirse la zona concreta en la que realizar el ensayo, evitándolas. Es por eso que tampoco se han descartado los valores outliers o aberrantes, en este caso los obtenidos en el Bloque 6 en la campaña de Compresión. Hablar de outliers en madera puede carecer de sentido.

La heterogeneidad hace alusión frecuentemente a la cantidad de especies arbóreas que existen, pero en esta Tesis Doctoral se ha llegado a la conclusión de que no solo entre las especies sino que dentro de la misma, existen apreciables diferencias. Este hecho complica mucho la caracterización de las especies y sus comportamientos, por tanto la definición de una matriz de *compliance*. Serían necesarios muchos ensayos más para poder establecer una tendencia del comportamiento. En esta Tesis Doctoral, no se ha dispuesto de medios materiales, humanos ni económicos suficientes como para acometer una campaña experimental mayor. Aun y todo, los resultados obtenidos en el estudio apuntan hacia una dirección, hacia la posibilidad real de aplicación la técnica de Hole Drilling en elementos estructurales de madera en la arquitectura, proporcionando datos objetivos sobre el estado tensional de los elementos estructurales con cierta seguridad.

Ejecución manual del proceso:

Otra conclusión extraída durante el proceso experimental de esta Tesis Doctoral es que muchos de los pasos que se siguen en el proceso experimental dependen de las habilidades del investigador, ya que se trata de un trabajo puramente tecnológico pero de confección manual. La destreza del investigador en la colocación de la roseta, la realización de las conexiones eléctricas y la perforación del agujero mediante el taladro son fundamentales para la obtención de unos resultados satisfactorios. Todas las tareas deben realizarse con un cuidado exquisito, y aun así, se aporta a los resultados un alto grado de imprecisión. Se enumeran a continuación las conclusiones deducidas del propio proceso llevado a cabo para la aplicación de la técnica de Hole Drilling sobre madera.

En la ejecución de los ensayos, pese a que se ha tratado de mantener un protocolo y un esmero y cuidado a la hora de proceder, cada ensayo ha sido realizado manualmente afectado por las siguientes tareas:

Probetas cortadas a mano. Las probetas utilizadas para los ensayos en el laboratorio han sido cortadas en carpintería, bajo la supervisión de la investigadora, pero sin utilizar máquinas de corte de gran precisión (análisis numérico).

Elección de la posición de la roseta. Se ha tratado de elegir una posición adecuada para la roseta, centrada cuando no hubiera alguna singularidad que lo impidiese. Sin embargo la elección de la posición ha sido intuitiva.

Lijado y limpieza de la superficie. Esta parte del proceso también se ha llevado a cabo de manera manual, tratando de dejar la superficie apta para continuar con el proceso. En el caso de los ensayos en los laboratorios, las probetas han sido pulidas en la carpintería mientras que las piezas en los casos reales de aplicación han sido lijadas in situ, con las imperfecciones que esto puede suponer.

Dibujo de la roseta. La posición exacta del centro del agujero y de cada una de las bandas alrededor ha sido medida y dibujada a mano mediante un lápiz de mina fina, escuadra, cartabón y escalímetro. En los últimos ensayos llevados a cabo en edificios reales, se ha realizado una plantilla de metacrilato en la que se marcan las direcciones de las tres bandas con el fin de facilitar el proceso de dibujo.

Pegado de las bandas extensométricas. Las galgas extensométricas han sido adheridas a mano sobre el dibujo anterior una a una. No existe un dispositivo comercial que facilite este trabajo, es decir una roseta compuesta por tres bandas en la escala que requiere esta aplicación. El tiempo de secado de las bandas tampoco es siempre el mismo y se espera un tiempo prudencial pero que no se ha contabilizado con exactitud.

Soldaduras y conexiones eléctricas. Una vez se han adherido las bandas a la superficie de la madera, se procede a hacer las conexiones eléctricas para poder registrar las deformaciones en el ordenador. Esas conexiones también son realizadas a mano, con las imprecisiones que pueden suponer. El tiempo de espera necesario de enfriamiento de las soldaduras tampoco está estipulado.

Realización de la perforación. El agujero que da nombre a esta técnica, es un paso fundamental para la obtención de las deformaciones por relajación. El agujero se realiza con la ayuda de un taladro convencional y una broca de pala para madera común. La broca es sustituida frecuentemente para evitar introducir fallos por una broca desgastada o poco afilada. Sin embargo, la realización del agujero no se hace siempre a la misma velocidad, ni de un solo golpe.

A favor hay que decir que todos los ensayos han sido realizados por la autora de esta Tesis Doctoral y que se asume una manera de proceder parecida en todas las mediciones llevadas a cabo en estos meses de investigación.

Precisión de las bandas extensométricas:

En contraposición al factor manual, que afecta a gran parte del proceso, se encuentra el carácter híper-preciso de las bandas extensométricas. Las bandas utilizadas para medir las deformaciones son capaces de medir la relajación del agujero en micras de metro por metro lineal ($\mu\text{m}/\text{m}$). Del mismo modo, también son capaces de percibir cualquier alteración o cambio en el entorno que no se ha podido regular en el proceso experimental y que han afectado a las mediciones de las deformaciones por relajación alrededor del agujero.

Canal de compensación:

En el software Catman®, utilizado para procesar los datos de deformación, se programaron cuatro canales. Tres canales para registrar cada una de las deformaciones en las galgas que componen la roseta alrededor de la perforación

y un canal de compensación, con objeto de cuantificar las alteraciones térmicas que pudieran darse por el paso de la intensidad eléctrica:

Canal 1: registra las deformaciones de la galga ϵ_1

Canal 2: registra las deformaciones de la galga ϵ_2

Canal 3: registra las deformaciones de la galga ϵ_3

Canal 4: resta las deformaciones de una galga auxiliar

El técnico que ayudó a la configuración del software, aconsejó restar a todos los canales esta cuarta medida para poder eliminar las alteraciones en la medida de la deformación en el perímetro del agujero. Esas alteraciones en la medición son debidas generalmente a las dilataciones por calentamiento de las bandas extensométricas ante el paso de la corriente eléctrica durante el tiempo que dura el ensayo y, en ocasiones, a las vibraciones de la máquina de carga durante los ensayos de laboratorio.

Esa cuarta medida se realizó mediante una galga extensométrica de idénticas propiedades a las de los canales 1, 2 y 3, adherida a un taco auxiliar de madera de pino radiata de la misma partida colocado cerca de máquina de ensayo en los laboratorios. Tanto en la Fase I como en la Fase II del proceso experimental se restaron a las mediciones de las bandas que forman la roseta las deformaciones por calentamiento de las propias bandas por el paso de la electricidad o temperatura del ambiente en el laboratorio (alrededor de $10 \mu\text{m/m}$).

Sin embargo, en los ejemplos de aplicación en las estructuras reales, se ha concluido que una corriente de aire puede afectar al canal de compensación ubicado en un taco de madera exento, pero no al punto donde se está llevando a cabo la medición de Hole Drilling. Las deformaciones por calentamiento de la banda o por vibraciones de la máquina de ensayo son prácticamente despreciables (entre 0 y $10 \mu\text{m/m}$ en la mayoría de los casos estudiados). Si el valor registrado en el canal de compensación supera las $10 \mu\text{m/m}$ de deformación, en valores absolutos, se aconseja sean despreciadas o no tenidas en cuenta.

Habitualmente se recomienda restar las deformaciones registradas en la banda de compensación sobre todo para eliminar las dilataciones térmicas de la bandas extensométricas cuando el ensayo dura mucho tiempo. Pero en el caso de aplicación in situ, en ensayos de estructuras reales, se aconseja que la cuarta banda sea colocada en el propio elemento analizado, cercana a la posición de la roseta, y no es un taco de madera exento. En los casos analizados en el Capítulo 9 la medición en la banda de compensación ha registrado deformaciones exageradas y se ha preferido no tenerla en cuenta. De modo que deformaciones captadas por los canales 1, 2 y 3 no se han compensado térmicamente, con los errores que se hayan podido introducir.

Módulos de elasticidad locales:

Los módulos elásticos utilizados en el desarrollo matemático de la presente Tesis Doctoral son los obtenidos durante el proceso de carga de las diferentes probetas. Son medidas locales tomadas por la galga extensométrica en el punto exacto de la superficie de la probeta donde posteriormente se realizará la perforación. En las normas de caracterización, los módulos de elasticidad son medidos a otra escala y no tan localmente por que se refieren a la elasticidad de un elemento completo y no de un punto. En los procesos de caracterización habitualmente se utilizan medidores LVDT, o sensores de desplazamiento, y miden en mm en lugar de μm . En este caso, se miden las deformaciones por relajación elástica y se optó por medir los módulos elásticos de esta manera más puntual para asegurar la elasticidad real de la pieza en el punto exacto de medición por Hole Drilling.

Distinta matriz de *compliance* en función de la sollicitación:

Dada la heterogeneidad de la madera en general, se precisa una matriz para cada especie arbórea o al menos para cada clase resistente. Además, la matriz de *compliance* es distinta, así como los valores de los módulos elásticos para cada tipo de sollicitación: una matriz y unos módulos de elasticidad para compresión y otros para flexión, al menos. Los datos expuestos en esta Tesis Doctoral hacen referencia siempre a elementos estructurales de madera de *pinus radiata* D. Don.

Laboratorio Vs in situ:

En el laboratorio se dispone de una comodidad a la hora de preparar el ensayo, inexistente en una estructura real. En el laboratorio, la probeta se prepara sobre una mesa, se dibuja la roseta con escuadra y cartabón sin mayores complicaciones, se adhieren las bandas y se realizan las conexiones con total comodidad. Finalmente se coloca la probeta en la máquina de ensayo con la seguridad de que el proceso de colocación y conexión de la roseta es correcto (Figura 10.7).

Figura 10.7

Algunas fotos del proceso de Hole Drilling en el laboratorio



Por el contrario, en una estructura real, el elemento objeto de estudio (una viga o vigueta) no se puede colocar sobre una mesa y preparar allí la superficie donde se va a colocar la roseta. En ese caso dibujar la roseta tiene sus incomodidades y realizar las soldaduras supone una complicación añadida (Figura 10.8).

Figura 10.8

Algunas fotos tomadas durante el proceso de Hole Drilling en estructuras reales



Además, en las mediciones realizadas en estructuras reales el/la investigador/a debe ir equipado/a con una serie de instrumentos y de accesorios auxiliares que se precisarán en la realización del ensayo in situ.

- Una luz frontal, para trabajar en mejores condiciones lumínicas
- Una escalera para acceder a la cara inferior de la viga
- Una alargadera para conectar todos los equipos necesarios
- Una lijadora para preparar la superficie
- Un estañador para realizar las conexiones
- Un ordenador portátil con el software necesario para registrar las deformaciones
- El equipo de Hole Drilling completo:
(incluye el sistema de adquisición de los datos de las deformaciones, galgas, taladro, adhesivo, cable, etc.)

La aplicación de la técnica Hole Drilling precisa tener que improvisar un pequeño laboratorio o taller en el que poder desempeñar todas las tareas de la manera más eficaz que sea posible (Figura 10.9).

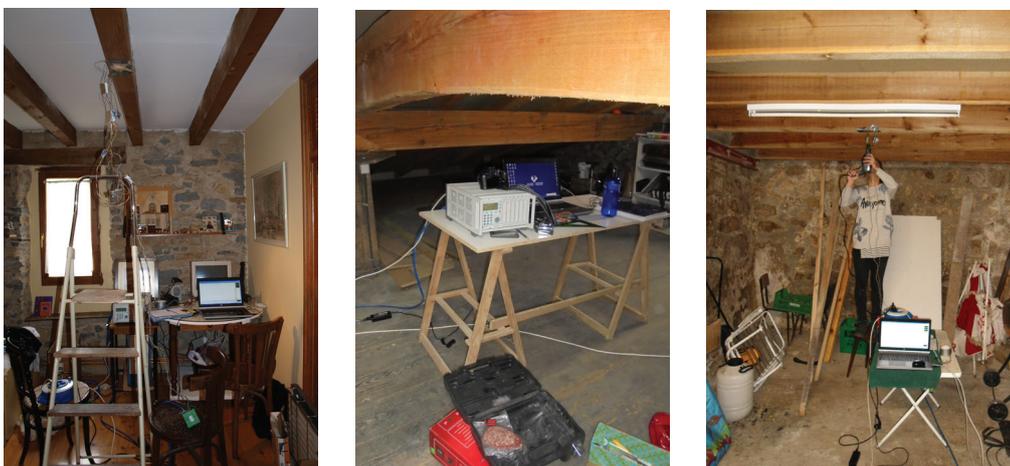


Figura 10.9

Dispositivos necesarios para la realización de la medición por Hole Drilling en estructuras reales, en servicio

10.2 Publicaciones y comunicaciones originadas por esta Tesis Doctoral

Esta Tesis Doctoral fue iniciada a finales del año 2013 y durante el proceso se ha originado material suficiente para ser publicado en diversos medios.

Comunicaciones en congresos internacionales

En Julio de 2015 se presentaron parte de los resultados obtenidos en la Fase de Compresión en el 14º Congreso Internacional STREMAH (*Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture*) celebrado en A Coruña:

CRESPO DE ANTONIO, M., LUENGAS-CARREÑO, D. and SÁNCHEZ-BEITIA, S., 2015. Advances for the on-site determination of the stresses state in timber structures in service, WESSEX INSTITUTE, ed. In: *STREMAH 2015 (14th International Conference on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture)*, 13 - 15 July 2015, WIT Press, pp. 771-781. [DOI: 10.2495/STR150641]

Y se colaboró en la redacción de otro artículo para ese mismo congreso:

LUENGAS-CARREÑO, D., CRESPO DE ANTONIO, M. and SÁNCHEZ-BEITIA, S., 2015. The evolution of Late-Medieval Seigniorial Residences in the Basque Country. Analysis of a Pre-Renaissance Palace: The Guevara Palace in Segura (Gipuzkoa-Spain), WESSEX INSTITUTE, ed. In: *STREMAH 2015 (14th International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture)*, 13-15 July 2015, WIT Press, pp. 407-418. [DOI: 10.2495/STR150341]

En Septiembre de 2016 se presentará la comunicación recientemente aprobada sobre los resultados de aplicación de la técnica de Hole Drilling en los ejemplos reales en el 10º congreso internacional SAHC (Structural Analysis of Historical Construction) que se celebrará en Lovaina (Bélgica):

CRESPO DE ANTONIO, M., LUENGAS-CARREÑO, D. and SÁNCHEZ-BEITIA, S., 2016. Applications of the hole-drilling technique in timber structures, *SAHC2016 (10th international conference on Structural Analysis of Historical Constructions)*, 12-16 September 2016 [Pendiente de publicación]

En paralelo, se ha colaborado en el estudio y la redacción de la siguiente comunicación, también aprobada recientemente para su presentación en el congreso internacional ICEFA (*International Conference on Engineering Failure Analysis*) que se celebrará en Leipzig (Alemania) el próximo Julio:

SÁNCHEZ-BEITIA, S., LUENGAS-CARREÑO, D. and CRESPO DE ANTONIO, M., 2016. First approach to detect in situ the length and number of little cracks on the analysis of the long time behavior in the historical stonework masonry constructions. *International Conference on Engineering Failure Analysis*, 3-6 July 2016 [Pendiente de publicación]

Publicaciones en revistas de alto impacto internacional

Los resultados obtenidos en la segunda fase de la campaña experimental realizada en Palencia, se publicaron en la revista *Construction and Building Materials*, en el cuartil Q1 según el ranking de Journal Citation Reports (JCR).

SÁNCHEZ-BEITIA, S., CRESPO DE ANTONIO, M. and ACUÑA, L., 2015. Applicability of the Hole-Drilling procedure for stresses quantification in timber bending elements in service. *Construction and Building Materials*, **93**, pp. 798-805.

Divulgación a escala local

Además de las publicaciones internacionales, la posibilidad de aplicar la técnica de Hole Drilling en la evaluación de las estructuras existentes de madera fue presentada por primera vez en Euskadi en el congreso de jóvenes investigadores Ikergazte, celebrado en Durango en mayo de 2015:

CRESPO DE ANTONIO, M. and SÁNCHEZ-BEITIA, S., 2015. Hole-drilling teknika zurezko egituren karakterizazioan, *I. Ikergazte Nazioarteko ikerketa euskaraz*, 13-15 May 2015, UEU (Udako Euskal Unibertsitatea), pp. 495-502.

Y a raíz de esa primera comunicación se han realizado varias aportaciones en referencia a la madera y a las estructuras de madera en la CAPV:

Se colaboró en una mesa redonda sobre investigación en estructuras de madera de las Jornadas Zura eta Egurra. En este encuentro, celebrado en Hernani en diciembre de 2015, se reunieron profesionales de distintas disciplinas en el sector de la madera de Euskadi, debatiendo acerca de la gestión de la madera:

Zura eta Egurra (<https://www.youtube.com/watch?v=WspMSR2XiE4>)

Finalmente, y a nivel más mediático, se acudió al programa radiofónico de Euskadi Irratia, Ekosfera, a hablar sobre la aplicación de la técnica Hole Drilling en las estructuras de madera existentes:

Ekosfera (<http://www.eitb.tv/eu/irratia/euskadi-irratia/ekosfera/3445534/3826408/zurezko-egitura-duten-etxe-blokeak-eta-hole-drilling-azterketa-modua/>)



Figura 10.10

Más información acerca de las publicaciones en el código QR

10.3 Líneas futuras

El futuro de esta técnica es muy esperanzador para el mundo de la inspección de las estructuras históricas y del análisis estructural en madera, pero es totalmente indispensable seguir investigando y desarrollando la técnica para obtener más y mejores resultados, ampliando sus aplicaciones a otros tipos/clases de madera.

Tras la investigación realizada para la redacción de este documento se pueden lanzar las siguientes cuestiones en las que se puede seguir trabajando en el futuro:

Facilitar la puesta en obra:

Los ensayos realizados en el desarrollo de esta Tesis Doctoral han servido, además de para obtener unos resultados pioneros y confirmar la validez de la técnica, para advertir ciertas dificultades a la hora de proceder a realizar la medición en una estructura real. Con el fin de facilitar el proceso interesa la fabricación a nivel comercial una roseta apta para esta aplicación, del mismo modo que las hay en una escala mucho menor para los casos de materiales isotrópicos (Figura 10.11 y Figura 10.12).

Figura 10.11

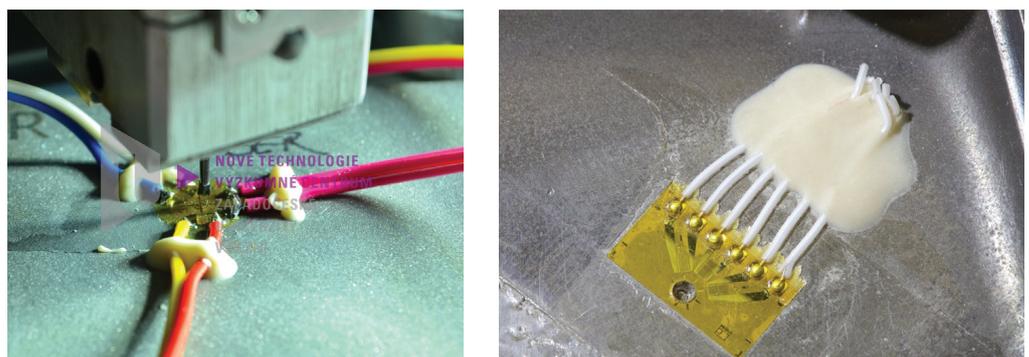
Diferentes dispositivos comerciales para la detección de tensiones residuales
(Fuente: www.hbm.com)



El hecho de tener que dibujar la roseta en una posición incómoda, pegar cada una de las galgas en su posición y realizar las soldaduras in situ, dificulta el proceso y además resta precisión. Si ha de fomentarse la aplicación de esta técnica, resulta imprescindible el desarrollo de una roseta apta para ser adherida de una sola vez y con las conexiones eléctricas pertinentes realizadas previamente y no in situ (Figura 10.12). Para las aplicaciones en los ejemplos reales se ha tratado de facilitar el proceso mediante plantillas en lugar de tener que dibujar, pero aun así lejos todavía de una regulación del ensayo.

Figura 10.12

Realización de Hole Drilling en materiales isotrópicos en escalas menores, utilizando los devices y rosetas comerciales que facilitan el ensayo



Se contempla la posibilidad de realizar una roseta que incluya las tres galgas extensométricas necesarias a la escala que precisa esta nueva aplicación, en las posiciones correspondientes y con el diámetro necesario para su utilización sobre elementos estructurales de madera, siempre y cuando haya una demanda. Es por eso vital seguir investigando y fomentando su uso en estructuras de madera.

El equipo utilizado para procesar los datos recogidos por las bandas extensométricas en la ejecución de los ensayos que se contemplan en esta Tesis Doctoral es antiguo y pesado. Se trata de un equipo MGCPlus de HBM, muy apto para los ensayos realizados en los laboratorios, pero resulta incómodo para ser transportado a los lugares donde se realizan los ensayos en estructuras reales. Existen en el mercado, otros equipos de adquisición de datos más compactos, ligeros y manejables, que ayudarían y facilitarían la realización de los ensayos fuera del laboratorio, en estructuras en servicio.

Una técnica menos destructiva:

La técnica Hole Drilling se considera poco destructiva, a caballo entre las totalmente no destructivas y las semidestructivas. Los tamaños de la roseta y del orificio siguen las relaciones que indica la Norma ASTM E837, pero en una escala mucho mayor con el fin del evitar la introducción de errores por el factor manual. Un paso a dar en el futuro es ajustar todavía más esas dimensiones para inferir un daño todavía menor al elemento estudiado. Se plantea la posibilidad de pasar de un diámetro del agujero de 18 mm, utilizado en los ensayos llevados a cabo en esta Tesis Doctoral, a uno de 10 mm en futuras aplicaciones. Para ello habría que diseñar otra campaña de investigación en el laboratorio para asegurar que las tensiones se relajan por completo en el perímetro de un agujero menor.

Caracterizar otras especies/clases resistentes:

Lo verdaderamente interesante es caracterizar las especies utilizadas en el patrimonio construido, pino autóctono (conocido en Euskadi como pino marítimo o itsas pinua, que corresponde al pino pinaster) y sobre todo el roble. El roble es la madera noble por antonomasia en nuestras latitudes. La madera de roble ha sido utilizada históricamente en la construcción de numerosos ejemplos de la arquitectura histórica, sin embargo se sabe poco a nivel técnico o normativo. No hay ensayos al respecto como para poder incluirlo en las normas. En el mundo de las frondosas aun hay mucho trabajo por delante, de hecho si se pretende trabajar con esta madera hay que mirar a Europa y a sus normas, porque a nivel nacional están todavía muy poco desarrolladas. En un futuro, se pretende realizar ensayos sobre probetas de roble, extraídas del derribo de una estructura histórica del municipio alavés de Basquiñuelas y seguir con un proceso similar al realizado en esta Tesis Doctoral (Figura 10.13).

Figura 10.13

Acopio de madera de roble (*quercus faginea*) recogido de un derribo para ser analizada en la próxima campaña experimental



Se ha recalcado la necesidad de calcular una matriz de *compliance* para cada tipo de sollicitación. En el caso que acomete esta Tesis Doctoral se ha calculado una matriz para elementos de pino radiata sometidos a compresión y otra para los elementos estructurales de la misma madera sometidos a flexión.

Además se ha abierto la posibilidad a no tener que realizar el mismo proceso para cada especie botánica sino para cada clase resistente, aludiendo por un lado a las coníferas y por otro a las frondosas. La matriz de *compliance* define un comportamiento elástico de la madera tras la relajación de las tensiones existentes derivadas de las cargas. Una futura línea de investigación se abre a la comprobación de que las distintas especies arbóreas, pero con comportamientos elásticos similares, responden del mismo modo a la técnica de Hole Drilling. Durante el desarrollo de esta labor de investigación, y habiendo conocido las normas AENOR en referencia a la madera estructural, se ha percibido que no se hace referencia no tanto a la especie botánica como a la clase resistente. Es posible que la relajación elástica tras realizar la perforación de Hole Drilling, no sea tan distinta entre las distintas especies sino entre las distintas clases resistentes.

No se descarta tampoco la posibilidad de una futura aplicación en otros materiales tecnológicos derivados de la madera, como la madera laminada o tablero estructural, materiales que son y serán muy utilizados en la construcción de las nuevas estructuras de madera en altura.

Obtener las constantes de *compliance* según la geometría de la pieza analizada:

En la última parte de este documento, se subrayó la importancia que la geometría de la pieza analizada adquiere en la aplicación de esta técnica. Los cortes de carpintería, la posición relativa de la médula o el discurso de los anillos de crecimiento con respecto al punto analizado, son algunos de los factores que afectan a la geometría de la pieza, distinguiendo planos tangenciales, radiales e intermedios. Se recomienda, por tanto, realizar un exhaustivo estudio en probetas antes de realizar la operación de Hole Drilling.

Debe estudiarse además la colocación o posición de la pieza objeto de estudio en el conjunto de la estructura. Una misma pieza estructural puede comportarse de diferente manera sea colocada de un modo o de otro. Por ejemplo, el ensayo puede ser realizado en un plano tangencial pero no será lo mismo si los anillos de crecimiento son convexos o cóncavos con respecto del punto analizado (Figura 10.14).

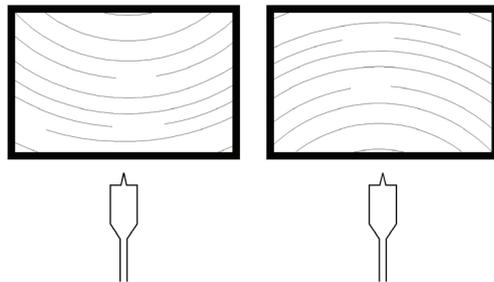


Figura 10.14

Secciones transversales de dos piezas aparentemente parecidas, pero colocadas de forma distinta con respecto a la posición relativa de los anillos de crecimiento (convexa o cóncava)

La labor de investigación en este camino del análisis estructural mediante la aplicación de la técnica Hole Drilling no ha hecho más que comenzar. Se abren numerosas líneas de investigación al respecto y se le augura un futuro prometedor.

Referencias

- ACUÑA, L., DÍEZ-BARRA, R. and CASADO, M., 2006. Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. *Boletín Informativo CIDEU*, (2), pp. 7-26.
- ACUÑA, L., DÍEZ-BARRA, R., CASADO, M., FERNÁNDEZ, A.L., SÁNCHEZ, M.T.L. and BASTERRA, L., 2007. Clasificación de madera estructural de *P. pinaster Ait.* Mediante ultrasonidos, *III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales (Iberomadera)*, Julio 2007 2007, INTA EEA Concordia, pp. A29.
- AGUILERA, C., RAMOS, M. and SALINAS, D., 2002. Visualización interna de nudos en rollizos de madera de *Pinus Radiata* D. Don utilizando Rayos-X. *Maderas.Ciencia y tecnología*, **4**(2), pp. 193-200.
- AICHHOLZER, A., ARTHABER, H., SCHUBERTH, C. and MAYER, H., 2013. Non-destructive evaluation of grain angle, moisture content and density of spruce with microwaves. *European Journal of Wood and Wood Products*, **71**(6), pp. 779-786.
- AINZ IBARRONDO, M.J., 2008. El monocultivo de pino radiata en el País Vasco: origen y claves de permanencia de un sistema de explotación contrario al desarrollo sostenible. *Estudios Geográficos CSIC*, **69**(265), pp. 335-356.
- ÁLVAREZ NOVES, H., 1982. La madera como aislamiento térmico. *Boletín de información técnica - AITIM*, **110**.
- ÁLVAREZ NOVES, H. and FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J., 1992. *Fundamentos teóricos del secado de la madera*.
- ÁLVAREZ, L., BASTERRA, L., CASADO, M. and ACUÑA, L., 2005. Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en Estructuras de madera, 2005, pp. 165-181.
- ANTHONY, R.W., RENFORTH, L. and NELSON, R., 1998. Nondestructive strength evaluation of *Pinus sylvestris* poles in the UK, *5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland 1998*, pp. 642-648.
- ARCINIEGAS, A., BRANCHERIAU, L. and LASAYGUES, P., 2015. Tomography in standing trees: revisiting the determination of acoustic wave velocity. *Annals of Forest Science*, **72**(6), pp. 685-691.
- ARRIAGA, F., ÁLVAREZ, M., GALLEGO, G. and GUTIERREZ, J., 1994. *Guía de la madera*. Madrid: AITIM.
- ARRIAGA, F., ESTEBAN, M. and ÍÑIGUEZ, G., 2010. Productos de madera para la construcción. *Guía de construir con madera*. Construir con Madera (CcM) edn. Madrid: Confemadera.

ARRIAGA, F., ÍÑIGUEZ, G., ESTEBAN, M. and BOBADILLA, I., 2007. Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades. *Informes de la Construcción*, **59**(506), pp. 29-41.

ARRIAGA, F., ÍÑIGUEZ, G., ESTEBAN, M. and DIVOS, F., 2012. Vibration method for grading of large cross-section coniferous timber species. *Holzforschung*, **66**(3), pp. 381-387.

ARRIAGA, F., PERAZA, F., ESTEBAN, M., BOBADILLA, I. and GARCÍA, F., 2002. *Intervención en estructuras de madera*. Madrid: AITIM.

ASCE, 2000. *Guideline for structural condition assessment of existing buildings*. American Society of Civil Engineers.

BALDI, A., 2014a. Residual Stress Analysis of Orthotropic Materials Using Integrated Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, **54**(7), pp. 1279-1292.

BALDI, A., 2014b. Residual Stress Measurement Using Hole Drilling and Integrated Digital Image Correlation Techniques. *Experimental Mechanics*, **54**(3), pp. 379-391.

BARILE, C., CASAVOLA, C., PAPPALETTERA, G. and PAPPALETTERE, C., 2014. Remarks on Residual Stress Measurement by Hole-Drilling and Electronic Speckle Pattern Interferometry. *Scientific World Journal*, , pp. 487149.

BASTERRA, L., ACUÑA, L., CASADO, M., RAMÓN-CUETO, G. and LÓPEZ, G., 2009. Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid). *Informes de la Construcción*, **61**(516), pp. 21-36.

BASTERRA, L., CASADO, M., ACUÑA, L., RAMÓN-CUETO, G., LÓPEZ, G., BARRANCO, I. and RELEA, E., 2005. Avance de propuestas metodológicas para el diagnóstico y análisis de estructuras de maderas históricas, *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Cádiz 2005*, pp. 27-29.

BERNABEI, M. and BONTADI, J., 2012. Dendrochronological analysis of the timber structure of the Church of the Nativity in Bethlehem. *Journal of Cultural Heritage*, **13**(4), pp. E54-E60.

BERT, C. and THOMPSON, G.L., 1968. A method for measuring planar residual stresses in rectangularly orthotropic materials. *Journal of Composite Materials*, **2**(2), pp. 244-253.

BETHGE, K., MATTHECK, C. and HUNGER, E., 1996. Equipment for detection and evaluation of incipient decay in trees. *Arboricultural Journal*, **20**(1), pp. 13-37.

BLOEDORN, R., VIOTTI, M., SCHROETER, R.B. and ALBERTAZZI, A., 2015. Analysis of Blind-Holes Applied in the Hole-Drilling Method for Residual Stress Mea-

surements. *Experimental Mechanics*, **55**(9), pp. 1745-1756.

BOBADILLA, I., ESTEBAN, M., ÍÑIGUEZ, G., ARRIAGA, F., BALLARÍN MONTESINOS, D. and PALACIOS MONTEAGUDO, J., 2007. Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad. *Informes de la Construcción*, **59**(506), pp. 107-116.

BOUCHARD, P.J., GEORGE, D., SANTISTEBAN, J., BRUNO, G., DUTTA, A., EDWARDS, L., KINGSTON, E. and SMITH, D.J., 2005. Measurement of the residual stresses in a stainless steel pipe girth weld containing long and short repairs. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **82**(4), pp. 299-310.

BRANCHERIAU, L. and BAILLÈRES, H., 2002. Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. *Wood Science and Technology*, **36**(4), pp. 347-365.

BRASHAW, B., VATALARO, R.J., WACKER, J.P. and ROSS, R., 2005. *Condition assessment of timber bridges.1.Evaluation of a micro-drilling resistance tool*, .

BUCUR, V., 2013. Nondestructive characterization and imaging of wood.

BUCUR, V. and ARCHER, R.R., 1984. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Science and Technology*, **18**(4), pp. 255-265.

BUITRAGO, G.V., LÓPEZ, A.P., CORONADO, A.P. and OSORNO, F.L., 2004. Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **8**(1), pp. 102-110.

CARBALLO J, HERMOSO E, FERNÁNDEZ-GOLFÍN JI, 2008. Influencia del tamaño en la predicción del módulo de elasticidad de vigas de madera de *Pinus pinaster* con técnicas vibratorias, *Actas del 2º Jornadas de Investigación en Construcción*, 2008 2008.

CARBALLO, J., HERMOSO, E., FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I. and CABRERO, J.C., 2007. Evaluación de técnicas vibratorias en la clasificación de la madera aserrada de pino radiata destinada a fines estructurales, *Actas del 11º Congreso Español de Ensayos No Destructivos*, July 2007, AEND (Asociación Española de Ensayos No Destructivos), pp. 305-316.

CÁRDENAS-GARCÍA, J., EKWARO-OSIRE, S., BERG, J. and WILSON, W., 2005. Non-linear least-squares solution to the moiré hole method problem in orthotropic materials. Part 1: Residual stresses. *Experimental Mechanics*, **45**(4), pp. 301-313.

CARTA DE VENECIA, 1964. Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios, *Segundo Congreso de Arquitectos y Técni-*

cos de Monumentos Históricos en Venecia 1964.

CASADO, M., ACUÑA, L., VECILLA, D., BASTERRA, L.A., PANDO, V. and RELEA, E., 2007. Determinación de la capacidad resistente de madera estructuras de *Pinus sylvestris* mediante PLG, *Actas del 11º Congreso Español de Ensayos No Destructivos*, July 2007, AEND (Asociación Española de Ensayos No Destructivos).

CASADO, M., ESCUDERO, I., ACUÑA, L., VECILLA, D., BASTERRA, L., RAMÓN-CUETO, G., LÓPEZ, G. and RELEA, E., 2009. Técnicas vibratorias aplicadas a madera estructural de *Populus x euramericana*, *Proceedings of 5º Congreso Forestal Español. Montes y Sociedad: Saber qué hacer* 2009, pp. 21-25.

CIB COMMISSION, 2010. Guide for the structural rehabilitation of heritage buildings, *CIB Publication* 2010.

CONDE GARCÍA, M., FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J. and HERMOSO, E., 2007. Improving the prediction of strength and rigidity of structural timber by combining ultrasound techniques with visual grading parameters. *Materiales de Construcción*, **57**(288), pp. 49-59.

COWN, D., 1978. Comparison of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. *New Zealand Journal of Forestry Science*, **8**(3), pp. 384-391.

CREUS NOVAU, J., 2000. Dendrocronología y dendroclimatología, o cómo los árboles nos cuentan el clima del pasado, *La reconstrucción del clima en época preinstrumental : V Reunión Nacional de Climatología 2000*, Universidad de Cantabria, pp. 81-122.

CRUZ, H., YEOMANS, D., TSAKANIKI, E., MACCHIONI, N., JORISSEN, A., TOUZA, M., MANNUCCI, M. and LOURENCO, P., 2015. Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, **9**(3), pp. 277-289.

D'AYALA, D., BRANCO, J., RIGGIO, M., HARTE, A., KURZ, J. and DESCAMPS, T., 2014. Assessment, reinforcement and monitoring of timber structures: FPS COST ACTION FP1101, *SAHC2014 (9th international conference on Structural Analysis of Historical Constructions)*, 14-17 October 2014.

DE ALMEIDA ROLLO, F.M., SOAVE JUNIOR, M.A., VIANA, S.M., PEREIRA ROLLO, L.C., ZARATE DO COUTO, H.T. and DA SILVA FILHO, D.F., 2013. Comparison between Resistography Readings and Tomographic Images for Internal Assessment in Trees Trunks. *Cerne*, **19**(2), pp. 331-337.

DE ANDRADE MAIA, O.M., SCHNEIDER, F.K., MAIA, J.M., COMAR NEVES, L. and DO ROCIO CHIARELLO PENTEADO, S., 2014. Wood characterization using the power spectral density and phase velocity of ultrasonic signals, *International*

Ultrasonics Symposium Proceedings, 3-6 September 2014, IEEE, pp. 1416-1419.

DIAZ, F., KAUFMANN, G.H. and GALIZZI, G.E., 2000. Determination of residual stresses using hole drilling and digital speckle pattern interferometry with automated data analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, **33**(1), pp. 39-48.

DINÇKAL, Ç, 2011. Analysis of elastic anisotropy of wood material for engineering applications. *Journal of Innovative Research in Engineering and Science*, **2**(2), pp. 67-80.

DIODATO, M., 2009. Huellas de artesanía constructiva. Características de los forjados históricos de Valencia, *Actas del 6º Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, 21-24 October 2009, Instituto Juan de Herrera, pp. 395-404.

DRAHOKOUPIL, R., 1930. The determination of the residual stress in the metallic workpieces by means of Roentgen radiancies. *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, **74**, pp. 1422-1422.

ESTEBAN, M., ARGÜELLES, R., ARRIAGA, F., ÍÑIGUEZ, G. and BOBADILLA, I., 2007. Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España. *Informes de la Construcción*, **59**(506), pp. 15-27.

FENG HAI-LIN, LI GUANG-HUI, FANG YI-MING and LI JIAN, 2010. Stress Wave Propagation Modeling and Application in Wood Testing. *Journal of System Simulation*, **22**(6), pp. 1490-1493.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J., CONDE GARCÍA, M., HERMOSO, E. and CARBALLO, J., 2008. Madera de pino radiata: conclusiones tras 25 años de trabajos. *Boletín de información técnica - AITIM*, (252), pp. 30-36.

FLETCHER, J. and TAPPER, M., 1984. Medieval artefacts and structures dated by dendrochronology. *Medieval archaeology*, **28**, pp. 112-132.

FLORES MARINÍ, C., 2014. Los nuevos paradigmas de la conservación del patrimonio cultural. 50 años de la Carta de Venecia. "PATRIMONIO": *ECONOMÍA CULTURAL Y EDUCACIÓN PARA LA PAZ (MEC-EDUPAZ)*, **2**(6), pp. 222-232.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (US), 1987. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison: United States Government Printing.

FRATTARI, A. and PIGNATELLI, O., 2005. Dendrochronology and non-destructive testing: synergies for dating ancient wooden structures of historic and cultural interest, *Proceedings of 8th International Conference on Non Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage*. Lecce, Italy 2005.

GAO, S., WANG, X., BRASHAW, B., ROSS, R. and WANG, L., 2012. Rapid Assessment of Wood Density of Standing Trees with Nondestructive Methods - A Review. *2012 International Conference on Biobase Material Science and Engi-*

neering (*Bmse*), , pp. 262-267.

GARCÍA-ESTEBAN, L. and GUINDEO-CASASÚS, A., 1990. *Anatomía de las maderas de frondosas españolas*. Madrid: AITIM.

GARCÍA-ESTEBAN, L. and GUINDEO-CASASÚS, A., 1998. *Anatomía e identificación de las maderas de coníferas españolas*. Madrid: AITIM.

GIRI, A., PANDEY, C., MAHAPATRA, M.M., SHARMA, K. and SINGH, P.K., 2015. On the estimation of error in measuring the residual stress by strain gauge rosette. *Measurement*, **65**, pp. 41-49.

GOBIERNO DE ESPAÑA, 2014. *Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyecto de absorción de dióxido de carbono (Referencia:BOE-A-2014-3379)*. España: .

GOBIERNO DE ESPAÑA, 1999. *Ley de Ordenación de la Edificación (LOE)*.

GOBIERNO VASCO, 2010. *Arquitectura y Madera. Guía de diseño de elementos estructurales adaptada al CTE*. Vitoria-Gazteiz: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.

GONZÁLEZ-DRIGO, R., PÉREZ-GRACIA, V., DI CAPUA, D. and PUJADES, L.G., 2008. GPR survey applied to Modernista buildings in Barcelona: The cultural heritage of the College of Industrial Engineering. *Journal of Cultural Heritage*, **9**(2), pp. 196-202.

HALABE, U., BIDIGALU, G., GANGARAO, H.V.S. and ROSS, R., 1997. Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. *Materials Evaluation*, **55**(9), pp. 1013-1018.

HANS, G., REDMAN, D., LEBLON, B., NADER, J. and LA ROCQUE, A., 2015. Determination of log moisture content using ground penetrating radar (GPR). Part 2. Propagation velocity (PV) method. *Holzforschung*, **69**(9), pp. 1125-1132.

HASEGAWA, M., MORI, M. and MATSUMURA, J., 2015. Relations of Fiber Length to Within-Tree Variation of Ultrasonic Wave Velocity in Fast-Growing Trees. *Wood and Fiber Science*, **47**(3), pp. 313-318.

HE, M. and DI, M., 2015. Using Non-Destructive Testing to Determine the Correlation between Dynamic Mechanical Properties and Bonding Strength of Wood-Plastic Composite Adhesive Joints. *Bioresources*, **10**(3), pp. 4913-4921.

HERMOSO, E., CARBALLO, J. and FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J., 2007. FROM PAIS VASCO (SPAIN) ACCORDING TO STANDARD MODIFICATIONS. *Maderas.Ciencia y tecnología*, **9**(3), pp. 223-232.

HERMOSO, E., FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J. and DÍEZ, M., 2003. Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos, *10ª Con-*

greso Nacional de ensayos no destructivos 2003, pp. 18-20.

HUANG, X., LIU, Z. and XIE, H., 2013. Recent Progress in Residual Stress Measurement Techniques. *Acta Mechanica Solida Sinica*, **26**(6), pp. 570-583.

ICOMOS/ISCARSAH COMMITTEE, 2005. Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. See www.icomos.org, .

IMPOSA, S., MELE, G., CORRAO, M., COCO, G. and BATTAGLIA, G., 2014. Characterization of Decay in the Wooden Roof of the S. Agata Church of Ragusa Ibla (Southeastern Sicily) by Means of Sonic Tomography and Resistograph Penetration Tests. *International Journal of Architectural Heritage*, **8**(2), pp. 213-223.

IN YOUNG YANG, KWANG HEE IM, HSU, D.K., SUN KYU KIM, SUNG JIN SOUG, HYEON CHO, JE WOUNG PARK and YOUNG NAM KIM, 2005. On nondestructive evaluation of wood materials using ultrasonic techniques. *Key Engineering Materials*, **297-300**, pp. 1973-8.

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

ÍÑIGUEZ, G., ARRIAGA, F., ESTEBAN, M. and ARGÜELLES, R., 2007. Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Informes de la Construcción*, **59**(506), pp. 97-105.

JAMES, W. and HAMILL, D., 1965. Dielectric properties of Douglas fir measured at microwave frequencies. *Forest Products Journal*, **15**(2), pp. 51.

JANIKOWSKI, D.S. and BLESSMAN, E.R., 2008. Manufacturing and Testing of Welded Stainless Steel Tubing: You Have a Choice Part 2—Feedwater Heater Tubing, *ASME 2008 Power Conference 2008*, American Society of Mechanical Engineers, pp. 381-393.

JAYNE, B.A., 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest products journal*, **9**(11), pp. 413.

JIAN LU, ZHU WU and BONGTAE HAN, 1998. Study of residual stress distribution by a combined method of moire interferometry and incremental hole drilling. II. Implementation. *Transactions of the ASME. Journal of Applied Mechanics*, **65**(4), pp. 844-50.

KABIR MF, KHALID KB, DAUD WM and AZIZ SH, 1997. Dielectric properties of rubber wood at microwave frequencies measured with an open-ended coaxial line. *Wood and Fiber Science*, **29**(4), pp. 319-324.

KASAL, B., 2014. Structural health assessment of in situ timber: an interface

between service life planning and timber engineering. *Wood Material Science & Engineering*, **9**(3), pp. 134-138.

KASAL, B., 2013. Assessment, Reinforcement and Monitoring of Timber Structures - COST FP1101. *Structural Health Assessment of Timber Structures*, **778**, pp. 1037-1040.

KASAL, B., 2003. Semi-destructive method for in-situ evaluation of compressive strength of wood structural members. *Forest Products Journal*, **53**(11/12), pp. 55-58.

KASAL, B. and ANTHONY, R.W., 2004. Advances in in situ evaluation of timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, **6**(2), pp. 94-103.

KASAL, B. and TANNERT, T., 2011. *In situ assessment of structural timber*. Springer Science & Business Media.

KOL, H.S. and YALCIN, I., 2015. Predicting Wood Strength using Dielectric Parameters. *Bioresources*, **10**(4), pp. 6496-6511.

KOLLMANN, F.F. and CÔTE JR, W.A., 1968. Principles of wood science and technology. vol. I. Solid Wood. *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I. Solid Wood*. Springer-Verlag, .

LAAKKONEN, M., RICKERT, T. and SUOMINEN, L., 2014. Stress Measurements in Glass and Plastic by Optical Hole-Drilling. *International Conference on Residual Stresses 9 (Icrs 9)*, **768-769**, pp. 95-100.

LAKE, B., APPL, F.J. and BERT, C., 1970. An investigation of the hole-drilling technique for measuring planar residual stress in rectangularly orthotropic materials. *Experimental Mechanics*, **10**(6), pp. 233-239.

LEAR, G.C., 2006. Improving the assessment of in situ timber members with the use of nondestructive and semi-destructive testing techniques.

LECHNER, T., 2013. *In-situ assessment of timber structures-Assessment methods and case studies*. Chalmers University of Technology.

LECHNER, T., SANDIN, Y. and KLIGER, R., 2013. Assessment of Density in Timber using X-Ray Equipment. *International Journal of Architectural Heritage*, **7**(4), pp. 416-433.

LIAO, C., ZHANG, H., WANG, X. and LI, D., 2015. Condition assessment of wood structural members at Yu Tomb of the Ming Dynasty, China. *Materials and Structures*, **48**(10), pp. 3259-3267.

LIOTTA, G., 2000. *Los insectos y sus daños en la madera: problemas de restauración*. Hondarribia: Editorial Nerea.

- LIU, J. and DECLERCQ, N.F., 2015. Investigation of the origin of acoustic Wood anomaly. *Journal of the Acoustical Society of America*, **138**(2), pp. 1168-1179.
- LIZEAGA, J., 2010. Datación de maderas muestreadas en la Casa de Cond-estable. *Trabajos de arqueología Navarra*, (22), pp. 249-260.
- LLOYD WRIGHT, F., 1928. In *the Cause of Architecture*, IV: The Meaning of Materials—Wood. *Architectural Record*, .
- LOMBILLO, I., THOMAS, C., VILLEGAS, L., FERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, J. and NORAMBUENA-CONTRERAS, J., 2013. Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests. *Construction and Building Materials*, **43**, pp. 266-277.
- LOMBILLO, I., VILLEGAS, L., SILIÓ, D. and HOPPE, C., 2008. Evaluación no destructiva del patrimonio construido. *Revista Internacional Construlink-RIC*, (16-NOV), pp. 40-53.
- LÓPEZ, G., 2010. *Aplicación de la termografía infrarroja en la evaluación no destructiva de estructuras de madera*, Universidad de Valladolid.
- LÓPEZ, G., BASTERRA, L. and ACUÑA, L., 2013. Estimation of wood density using infrared thermography. *Construction and Building Materials*, **42**, pp. 29-32.
- LÓPEZ, G., BASTERRA, L., RAMÓN-CUETO, G. and DE DIEGO, A., 2014. Detection of Singularities and Subsurface Defects in Wood by Infrared Thermography. *International Journal of Architectural Heritage*, **8**(4), pp. 517-536.
- MACHADO, J.S., 2013. In Situ Evaluation of the Reference Properties of Structural Timber Members. Use of Available Tools and Information. *Advanced Materials Research*, **778**, pp. 137-144.
- MAINJOT, A.K., SCHAJER, G., VANHEUSDEN, A.J. and SADOON, M., 2011. Residual stress measurement in veneering ceramic by hole-drilling. *Dental materials*, **27**(5), pp. 439-444.
- MALDONADO, I.B., ÍÑIGUEZ, G. and ARRIAGA, F., 2009. Técnicas no destructivas en la inspección de estructuras de madera I: el penetrómetro. *Boletín de información técnica - AITIM*, (260), pp. 66-70.
- MARTINEZ-GARCIA, V., WENZELBURGER, M., KILLINGER, A., PEDRINI, G., GADOW, R. and OSTEN, W., 2014. Residual Stress Measurement with Laser-Optical and Mechanical Methods. *Residual Stresses IX*, **996**, pp. 256-261.
- MATHAR, J., 1934. Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes. *Trans.ASME*, **56**(4), pp. 249-254.
- MEIER, H., 1937. Residual stress in railway tracks. *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, **81**, pp. 362-363.

MENA, V., 1998. Efecto de las características de las trozas en el aprovechamiento de madera libre de nudos de *Pinus radiata* D. Don. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, .

MERINO, E.G., 2009. La dendrocronología: métodos y aplicaciones. *Arqueología nàutica mediterrània*, , pp. 309-322.

MICHEL, M., 2006. El pino radiata en la historia forestal vasca. *Sustrai: revista agropesquera*, (75), pp. 56-59.

MICHEL, M., 2004. *El pino radiata (" Pinus radiata" D. Don) en la historia de la Comunidad Autónoma de Euskadi: análisis de un proceso de forestalismo intensivo*. Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia= Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.

MIN, Y., HONG, M., XI, Z. and JIAN, L., 2006. Determination of residual stress by use of phase shifting moire interferometry and hole-drilling method. *Optics and Lasers in Engineering*, **44**(1), pp. 68-79.

MONTERO, M., DE LA MATA, J., ESTEBAN, M. and HERMOSO, E., 2015. Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of Scots pine from Spain. *Maderas.Ciencia y tecnología*, (AHEAD), pp. 0-0.

MONTÓN LECUMBERRI, J., 2012. *Clasificación estructural de la madera de " Pinus radiata" D. Don procedente de Cataluña mediante métodos no destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural*, Universitat Politècnica de Catalunya.

NAU, A. and SCHOLTES, B., 2013. Evaluation of the High-Speed Drilling Technique for the Incremental Hole-Drilling Method. *Experimental Mechanics*, **53**(4), pp. 531-542.

NELSON, D.V. and MCCRICKERD, J.T., 1986. Residual-Stress Determination through Combined use of Holographic-Interferometry and Blind-Hole Drilling. *Experimental Mechanics*, **26**(4), pp. 371-378.

NUERE, E., 2007. Madera, en restauración y rehabilitación. *Informes de la Construcción*, **59**(506), pp. 123-130.

PAGLIARO, P. and ZUCCARELLO, B., 2007. Residual stress analysis of orthotropic materials by the through-hole drilling method. *Experimental Mechanics*, **47**(2), pp. 217-236.

PALAIÀ, L., 2014. Use of wood penetrometer for the diagnosis of timber structures in service, in old buildings. *Informes De La Construcción*, **66**(533), pp. e003.

PARLAMENTO EUROPEO, 2010. *Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo*

y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (Referencia: DOUE-L-2010-81077)
 . Europa.

PELLERIN, R. and ROSS, R., *Non-destructive test method for structural members|uses computer to provide stress wave attenuation and velocity data derived from two points on member together with density of material.*

PÉREZ-GRACIA, V., 2011. *Informe sobre los resultados de la exploración con GPR de la Avenida Giorgeta, en Valencia.* Universidad Politécnica de Catalunya: UPCCommons.

PÉREZ-GRACIA, V., 2001. Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico.

PÉREZ-GRACIA, V., CANAS, J., PUJADES, L.G., CLAPÉS, J., CASELLES, O., GARCÍA, F. and OSORIO, R., 2000. GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain). *Journal of Applied Geophysics*, **43**(2), pp. 167-174.

PÉREZ-GRACIA, V., CASELLES, O., CLAPÉS, J., OSORIO, R., MARTÍNEZ, G. and CANAS, J., 2009. Integrated near-surface geophysical survey of the Cathedral of Mallorca. *Journal of Archaeological Science*, **36**(7), pp. 1289-1299.

PÉREZ-GRACIA, V., GARCÍA, F., PUJADES, L.G., DRIGO, R.G. and DI CAPUA, D., 2008. GPR survey to study the restoration of a Roman monument. *Journal of Cultural Heritage*, **9**(1), pp. 89-96.

PEREZ-GRACIA, V., SANTOS-ASSUNCAO, S., CASELLES, O., CLAPÉS, J. and CANAS, J., 2014. Study of wood beams in buildings with ground penetrating radar, *Ground Penetrating Radar (GPR), 2014 15th International Conference on 2014*, IEEE, pp. 31-35.

PISAREV, V.S., ELEONSKY, S.I. and CHERNOV, A.V., 2015. Residual Stress Determination in Orthotropic Composites by Displacement Measurements Near Through Hole. *Experimental Mechanics*, **55**(7), pp. 1225-1238.

PONOMAREV, I.I., POPOV, A.L. and CHERNYSHEV, G.N., 1994. Determination of residual hardening stresses in glass by holographic interferometry. *Mechanics of Solids*, **29**(5), pp. 170-5.

PRASAD, C., PRABHAKARAN, R. and TOMPKINS, S., 1987a. Determination of calibration constants for the hole-drilling residual stress measurement technique applied to orthotropic composites—Part I: Theoretical considerations. *Composite structures*, **8**(2), pp. 105-118.

PRASAD, C., PRABHAKARAN, R. and TOMPKINS, S., 1987b. Determination of calibration constants for the hole-drilling residual stress measurement technique applied to orthotropic composites—Part II: Experimental evaluations.

Composite structures, **8**(3), pp. 165-172.

PROTOCOLO DE KYOTO, 1998. Marco de Las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *Naciones Unidas*, **25**, pp. 27.

QIN LE, XIE HUIMIN, ZHU RONGHUA, WU DAN, CHE ZHIGANG and ZOU SHIKUN, 2014. Study of the location of testing area in residual stress measurement by Moire interferometry combined with hole-drilling method. *Science China-Physics Mechanics & Astronomy*, **57**(4), pp. 708-715.

QUEIPO DE LLANO MOYA, JUAN, GONZÁLEZ RODRIGO, B., LLINARES CERVERA, M., VILLAGRÁ FERNÁNDEZ, C. and GALLEGO GUINEA, V., 2010. Conceptos básicos de construir con madera. *Guía de Construir con Madera*. Construir con Madera (CcM) edn. Madrid: Confemadera, .

REISSNER, H., 1931. Residual stress and residual stress sources. *Zeitschrift Fur Angewandte Mathematik Und Mechanik*, **11**, pp. 1-8.

RENDLER, N. and VIGNESS, I., 1966. Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses. *Experimental Mechanics*, **6**(12), pp. 577-586.

RENDLER, N. and VIGNESS, I., 1965. Methods and Techniques for Nondestructive Testing. *Report of Nrl Progress*, (JUL), pp. 21-&.

RIGGIO, M., ANTHONY, R.W., AUGELLI, F., KASAL, B., LECHNER, T., MULLER, W. and TANNERT, T., 2014. In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. *Materials and Structures*, **47**(5), pp. 749-766.

RINN, F., 1996a. Resistographic visualization of tree-ring density variations. *Tree rings, environment, and humanity, radiocarbon*. Department of Geosciences, The University of Arizona, Tucson, , pp. 871-878.

RINN, F., 1996b. Resistographic visualization of tree-ring density variations. *Tree rings, environment, and humanity, radiocarbon*. Department of Geosciences, The University of Arizona, Tucson, , pp. 871-878.

RINN, F., SCHWEINGRUBER, F. and SCHÄR, E., 1996. Resistograph and X-ray density charts of wood. Comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, **50**(4), pp. 303-311.

RODRIGUEZ-ABAD, I., 2009. *Evaluación de la técnica no destructiva del georadar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera*, Universidad Politécnica de Valencia.

SAFARABADI, M., 2015. Prediction of calibration factors of the hole-drilling method for orthotropic composites including hybrid interphase region. *Journal of Composite Materials*, **49**(9), pp. 1081-1089.

SAHIN, H. and AY, N., 2004. Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies. *Journal of Wood Science*, **50**(4), pp. 375-380.

SÁNCHEZ-BEITIA, S., Material no publicado. *Los análisis previos en el proceso de actuaciones sobre las construcciones históricas*. Material no publicado edn. Donostia-San Sebastian: .

SÁNCHEZ-BEITIA, S., 2015. On-site Stress Measurements of a Flying Buttress in the Palma de Mallorca (Spain) Cathedral. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, , pp. 1-5.

SÁNCHEZ-BEITIA, S., 2008. Stress analysis of the piers of the Tarazona Cathedral (Zaragoza–Spain) by means of the hole-drilling technique. *Construction and Building Materials*, **22**(5), pp. 966-971.

SÁNCHEZ-BEITIA, S., 2007a. The hole-drilling technique for the stresses measurements in brick masonries. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture X*, **95**, pp. 289-298.

SÁNCHEZ-BEITIA, S., 2007b. Stresses analysis at the Altes Museum of Berlin by means of the Hole-Drilling technique (Donostia Method). *Construction and Building Materials*, **21**(8), pp. 1680-1687.

SÁNCHEZ-BEITIA, S., CRESPO DE ANTONIO, M. and ACUÑA, L., 2015. Applicability of the Hole-Drilling procedure for stresses quantification in timber bending elements in service. *Construction and Building Materials*, **93**, pp. 798-805.

SÁNCHEZ-BEITIA, S. and ROCA, P., 2014. Hole Drilling technique for on-site stress measurements of masonry piers: analysis of the Santa Maria del Mar Cathedral in Barcelona, Spain. *Journal of Architectural Engineering*, .

SÁNCHEZ-BEITIA, S. and SCHUEREMANS, L., 2009. The hole drilling technique for on site deduction of the stresses states in stone masonry by using eight strain gages. *Construction and Building Materials*, **23**(5), pp. 2041-2046.

SÁNCHEZ-BEITIA, S., SCHUEREMANS, L. and VAN BALEN, K., 2009. On-Site Stress Measurement on the Piers of the Saint Jacobs Church in Leuven, Belgium. *International Journal of Architectural Heritage*, **3**(2), pp. 110-125.

SÁNCHEZ-BEITIA, S., TORRES, L., BARRALLO, J. and IRAOLA, B., 2012. *The Hole Drilling Technique on Timber Structures: Previous Tests*. WROCLAW; 53-204, WROCLAW UL OJACA BEZYMA 20 B, WROCLAW, 00000, POLAND: DOLNOSLASKIE WYDAWNICTWO EDUKACYJNE-DWE.

SCHAJER, G., 2013. *Practical residual stress measurement methods*. John Wiley & Sons.

SCHAJER, G., 2010a. Hole-Drilling Residual Stress Measurements at 75: Origins, Advances, Opportunities. *Experimental Mechanics*, **50**(2), pp. 245-253.

SCHAJER, G., 2010b. Relaxation Methods for Measuring Residual Stresses: Techniques and Opportunities. *Experimental Mechanics*, **50**(8), pp. 1117-1127.

SCHAJER, G., 1988a. Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method. part II—practical application of the integral method. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **110**(4), pp. 344-349.

SCHAJER, G., 1988b. Measurement of Non-Uniform Residual-Stresses using the Hole-Drilling Method .1. Stress Calculation Procedures. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme*, **110**(4), pp. 338-343.

SCHAJER, G., 1981. Application of finite element calculations to residual stress measurements. *Journal of engineering materials and technology*, **103**(2), pp. 157-163.

SCHAJER, G. and ALTUS, E., 1996. Stress calculation error analysis for incremental hole-drilling residual stress measurements. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **118**(1), pp. 120-126.

SCHAJER, G. and ORHAN, F.B., 2006. Measurement of wood grain angle, moisture content and density using microwaves. *Holz als Roh-und Werkstoff*, **64**(6), pp. 483-490.

SCHAJER, G. and STEINZIG, M., 2005. Full-field calculation of hole drilling residual stresses from electronic speckle pattern interferometry data. *Experimental Mechanics*, **45**(6), pp. 526-532.

SCHAJER, G. and TOOTOONIAN, M., 1997. A new rosette design for more reliable hole-drilling residual stress measurements. *Experimental Mechanics*, **37**(3), pp. 299-306.

SCHAJER, G. and YANG, L., 1994. Residual-stress measurement in orthotropic materials using the hole-drilling method. *Experimental Mechanics*, **34**(4), pp. 324-333.

SCHOCH, W.H., HELLER, I., SCHWEINGRUBER, F. and KIENAST, F., 2004. *Wood anatomy of central European Species*. WSL.

SCHWARZ, R.C., KUTT, L.M. and PAPAZIAN, J.M., 2000. Measurement of residual stress using interferometric moire: A new insight. *Experimental Mechanics*, **40**(3), pp. 271-281.

SCHWEIZER, F., DICKELE, M. and LUKE, M., 2014. Application of the incremental hole-drilling method for the determination of residual stresses in glass-fiber reinforced composites. *Residual Stresses Ix*, **996**, pp. 262-268.

SEOANE, I. and 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 in-*

formación técnica - AITIM, **136**, pp. 66-71.

SHOKRIEH, M.M., 2007. Simulation of central hole drilling process for measurement of residual stresses in isotropic, orthotropic, and laminated composite plates. *Journal of Composite Materials*, **41**(4), pp. 435-452.

SHOKRIEH, M.M. and KAMALI, S.M., 2005. Theoretical and experimental studies on residual stresses in laminated polymer composites. *Journal of Composite Materials*, **39**(24), pp. 2213-2225.

SMITH, I., LANDIS, E. and GONG, M., 2003. *Fracture and fatigue in wood*. John Wiley & Sons.

SOBUE, N., 1986a. Instantaneous Measurement of Elastic-Constants by Analysis of the Tap Tone of Wood - Application to Flexural Vibration of Beams. *Mokuzai Gakkaishi*, **32**(4), pp. 274-279.

SOBUE, N., 1986b. Measurement of Young Modulus by the Transient Longitudinal Vibration of Wooden Beams using a Fast Fourier Transformation Spectrum Analyzer. *Mokuzai Gakkaishi*, **32**(9), pp. 744-747.

SOETE, W. and VANCROMBRUGGE, R., 1950. An industrial method for the determination of residual stresses. *Proc.SESA*, **8**(1), pp. 17-28.

SONG SHIQUAN, XU HUADONG and WANG LIHAI, 2011. Application of ultrasonic wave and resistograph for nondestructive testing of defects in standing trees. *Measuring Technology and Mechatronics Automation, Pts 1 and 2*, **48-49**, pp. 265-269.

SUMIYOSHI, T. and MATSUI, G., 1991. *Wood joints in classical Japanese architecture*. Tokyo: Kajima Institute Pub. Co.

TANASOIU, V., MICLEA, C. and TANASOIU, C., 2002. Nondestructive testing techniques and piezoelectric ultrasonics transducers for wood and built in wooden structures. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **4**(4), pp. 949-957.

TANNERT, T., ANTHONY, R.W., KASAL, B., KLOIBER, M., PIAZZA, M., RIGGIO, M., RINN, F., WIDMANN, R. and YAMAGUCHI, N., 2014. In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques. *Materials and Structures*, **47**(5), pp. 767-785.

TINGA, W.R., 1969. Dielectric properties of Douglas fir at 2.45 GHz. *Journal of Microwave Power*, **4**(3), pp. 162-4.

TURNBULL, A., MAXWELL, A.S. and PILLAI, S., 1999. Residual stress in polymers - Evaluation of measurement techniques. *Journal of Materials Science*, **34**(3), pp. 451-459.

VERMAAS, H.F., 1973. Regression Equations for Determining Dielectric Properties of Wood. *Holzforschung*, **27**(4), pp. 132-136.

VIGNOTE, S., PERAZA, F. and PEREZAGUA, R., 1985. *Tecnología del aprovechamiento de la madera de pino insigne "pino radiata"*. Madrid: AITIM.

VIOTTI, M. and ALBERTAZZI, A., 2013. Compact sensor combining digital speckle pattern interferometry and the hole-drilling technique to measure nonuniform residual stress fields. *Optical Engineering*, **52**(10), pp. 101905-101905.

VITRUVIO, M.L., 2010. *Los diez libros de arquitectura*. Linkgua digital.

VON LAUE, M., 1931. A theorem on residual stress. *Sitzungsberichte Der Preussischen Akademie Der Wissenschaften Physikalisch-Mathematische Klasse*, , pp. 377-382.

VON MIRBACH, D., 2014. Hole-drilling method for residual stress measurement - consideration of elastic-plastic material properties. *Materials Science Forum*, **768-769**, pp. 174-181.

WANG, X.P., ROSS, R., MCCLELLAN, M., BARBOUR, R.J., ERICKSON, J.R., FORSMAN, J.W. and MCGINNIS, G.D., 2001. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood and Fiber Science*, **33**(4), pp. 522-533.

WILLIAMS, J.G. and GAMONPILAS, C., 2008. Using the simple compression test to determine Young's modulus, Poisson's ratio and the Coulomb friction coefficient. *International Journal of Solids and Structures*, **45**(16), pp. 4448-4459.

WU, Z., LU, J.A. and HAN, B.T., 1998. Study of residual stress distribution by a combined method of moire interferometry and incremental hole drilling, part II: Implementation. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme*, **65**(4), pp. 844-850.

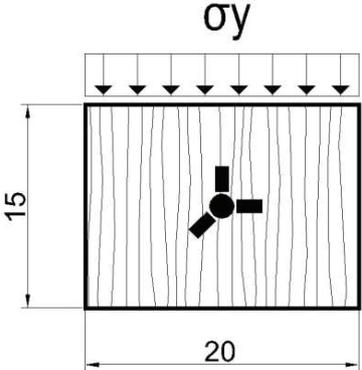
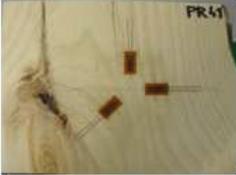
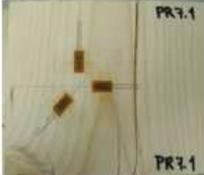
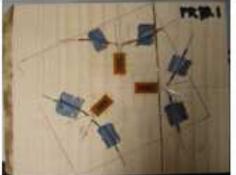
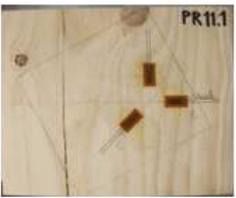
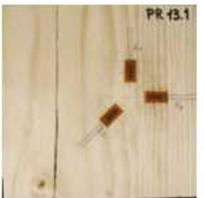
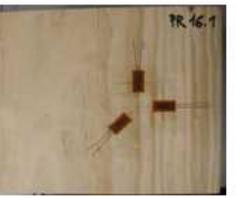
ZHU WU, JIAN LU and BONGTAE HAN, 1998. Study of residual stress distribution by a combined method of moire interferometry and incremental hole drilling. I. Theory. *Transactions of the ASME. Journal of Applied Mechanics*, **65**(4), pp. 837-43.

Anexo1: Resultados de los ensayos a Compresión

En el Capítulo 7 se tomó como ejemplo los datos obtenidos en la probeta B10 para determinar el procedimiento para el cálculo de los módulos elásticos (E_y y E_x) y de las constantes de compliance (c_{ij}) para el caso de las probetas sometidas a compresión en el laboratorio de Donostia-San Sebastián.

A continuación se recogen los datos en referencia a todas las probetas analizadas en la Fase I de la parte experimental.

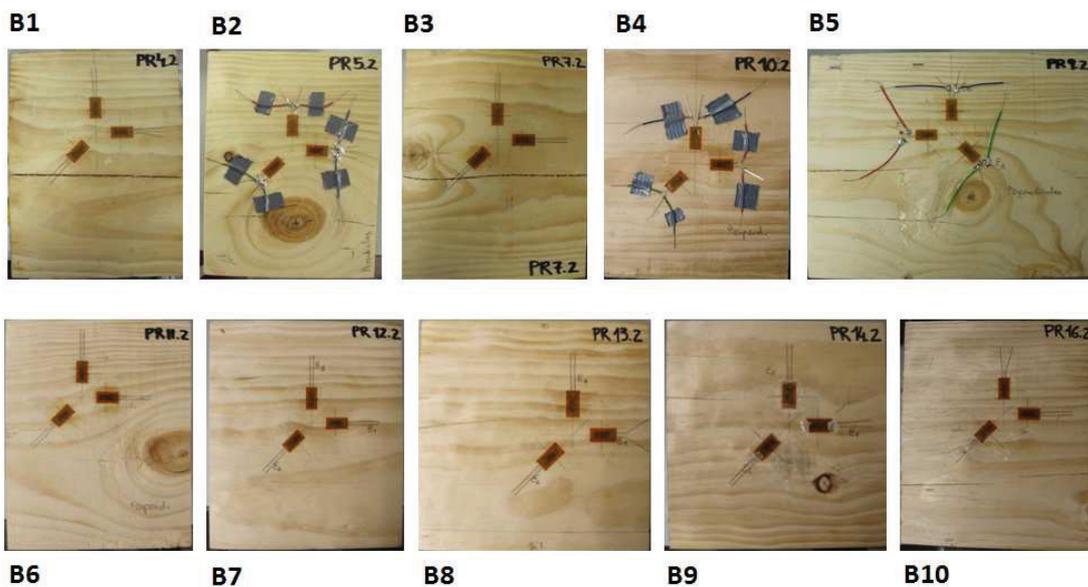
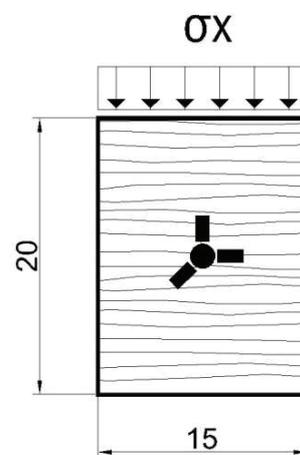
Fichas Bloques

| Bloques Compresión Axial | | |
|--|---|--|
| Dimensiones [b x h x l] | 20 cm x 20 cm x 15 cm (aprox.) |  |
| Carga en máquina | $Q_{\text{máq}} = 8 \text{ Tn}$ | |
| Tensión máxima en el eje Y | $\sigma_y = 1,82 - 3,70 \text{ MPa}^*$ | |
| Superficie de contacto | $S = 400 \text{ cm}^2 \text{ (aprox.)}^*$ | |
| Número de ensayos | 10 | |
| <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>B1</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B2</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B3</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B4</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B5</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B6</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B7</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B8</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B9</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B10</p>  </div> </div> | | |

*Depende de la geometría de la probeta

Bloques Compresión Perpendicular

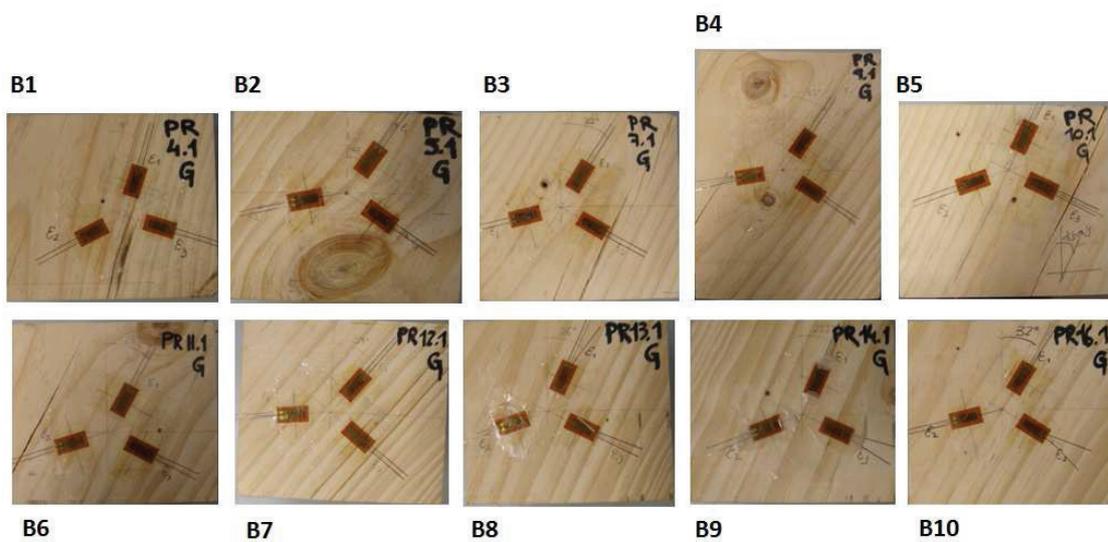
| | |
|-----------------------------------|--|
| Dimensiones [b x h x l] | 15 cm x 20 cm x 20 cm (aprox.) |
| Carga en máquina | $Q_{\text{máq}} = 7 \text{ Tn}$ |
| Tensión máxima en el eje X | $\sigma_x = 1,96 - 2,73 \text{ MPa}^*$ |
| Superficie de contacto | $S = 300 \text{ cm}^2$ (aprox.)* |
| Número de ensayos | 10 |



*Depende de la geometría de la probeta

Bloques Compresión Oblicua [Cara 1]

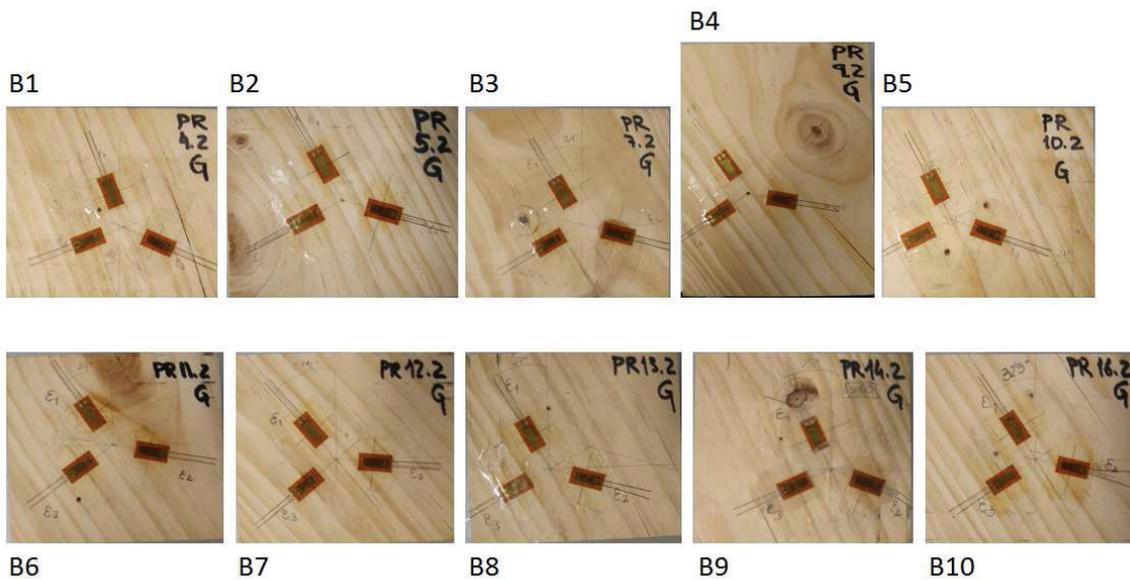
| | | |
|------------------------------------|--|--|
| Dimensiones [b x h x l] | 12 cm x 11 cm x 14 cm (aprox.) | |
| Carga en máquina | $Q_{máq} = 7 \text{ Tn}$ | |
| Tensión máxima en el eje Y' | $\sigma_{\gamma'} = 3,96 - 4,95 \text{ MPa}^*$ | |
| Superficie de contacto | $S = 168 \text{ cm}^2 \text{ (aprox.)}^*$ | |
| Número de ensayos | 10 | |



*Depende de la geometría de la probeta

Bloques Compresión Oblicua [Cara 2]

| | | |
|--------------------------------|---|--|
| Dimensiones [b x h x l] | 12 cm x 11 cm x 14 cm (aprox.) | |
| Carga en máquina | $Q_{máq} = 7 \text{ Tn}$ | |
| Tensión en el eje Y' | $\sigma_{y'} = 3,96 - 4,95 \text{ MPa}^*$ | |
| Superficie de contacto | $S = 168 \text{ cm}^2 \text{ (aprox.)}^*$ | |
| Número de ensayos | 10 | |



*Depende de la geometría de la pieza

Resultados de los Módulos de Elasticidad a Compresión

Módulos de Elasticidad E_y
[Tablas]

| B1, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -20,5 | -35,5 | -51,5 | -62,2 | -39 |
| σ_y (MPa) | -0,7 | -1,21 | -1,76 | -2,12 | -1,33 |
| ε_1 ($\mu\text{m/m}$) | -85 | -110 | -142 | -169 | -86 |
| E_y (MPa) | 13492 | | | | |

| B2, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -21,5 | -45,5 | -54 | -66 | -39 |
| σ_y (MPa) | -0,59 | -1,25 | -1,49 | -1,18 | -1,07 |
| ε_1 ($\mu\text{m/m}$) | -153 | -272 | -303 | -349 | -262 |
| E_y (MPa) | 6221 | | | | |

| B3, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -22,5 | -37 | -52 | -67 | -39 |
| σ_y (MPa) | -0,77 | -1,26 | -1,78 | -2,29 | -1,33 |
| ε_1 ($\mu\text{m/m}$) | -56 | -110 | -165 | -234 | -168 |
| E_y (MPa) | 8074 | | | | |

| B4, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -24,3 | -31 | -43 | -55 | -70,5 |
| σ_y (MPa) | -0,68 | -0,87 | -1,21 | -1,54 | -1,98 |
| ε_1 ($\mu\text{m/m}$) | -52 | -63 | -94 | -123 | -154 |
| E_y (MPa) | 12333 | | | | |

| B5, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -11 | -23,5 | -36 | -52,5 | -66 |
| σ_y (MPa) | -0,38 | -0,80 | -1,23 | -1,79 | -2,25 |
| ε_1 ($\mu\text{m/m}$) | -16 | -35 | -57 | -88 | -115 |
| E_y (MPa) | 18823 | | | | |

| B6, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -13,5 | -26 | -37,8 | -50,5 | -66,8 |
| σ_y (MPa) | -0,45 | -0,87 | -1,27 | -1,69 | -2,34 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | -90 | -192 | -306 | -437 | -611 |
| E_y (MPa) | 3393 | | | | |

| B7, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -10 | -20,3 | -30,5 | -40,5 | -48 |
| σ_y (MPa) | -0,34 | -0,68 | -1,02 | -1,36 | -1,61 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | -22 | -45 | -70 | -97 | -117 |
| E_y (MPa) | 13339 | | | | |

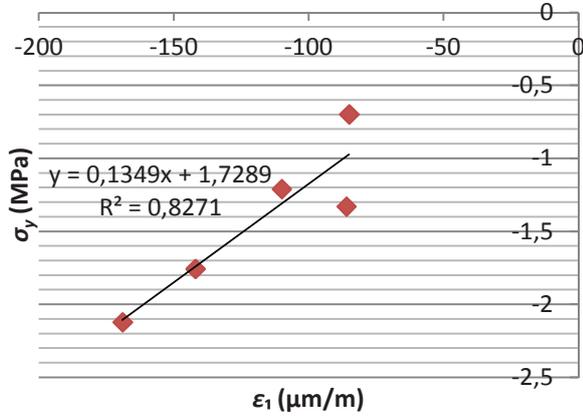
| B8, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -13,5 | -25,5 | -36 | -48 | -64 |
| σ_y (MPa) | -0,64 | -1,21 | -1,71 | -2,27 | -3,03 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | -23 | -50 | -71 | -106 | -150 |
| E_y (MPa) | 18702 | | | | |

| B9, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -11,5 | -23 | -35,8 | -53,3 | -69 |
| σ_y (MPa) | -0,49 | -0,97 | -1,51 | -2,25 | -2,91 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | -40 | -80 | -126 | -187 | -240 |
| E_y (MPa) | 12107 | | | | |

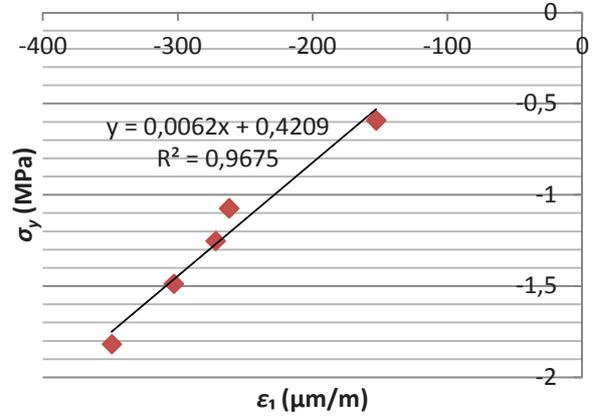
| B10, compresión paralela a las fibras | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -13 | -29 | -44,7 | -59,5 | -74 |
| σ_y (MPa) | -0,51 | -1,14 | -1,75 | -2,33 | -2,90 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | -79 | -161 | -248 | -359 | -436 |
| E_y (MPa) | 10871 | | | | |

Módulos de Elasticidad E_y
[Gráficos]

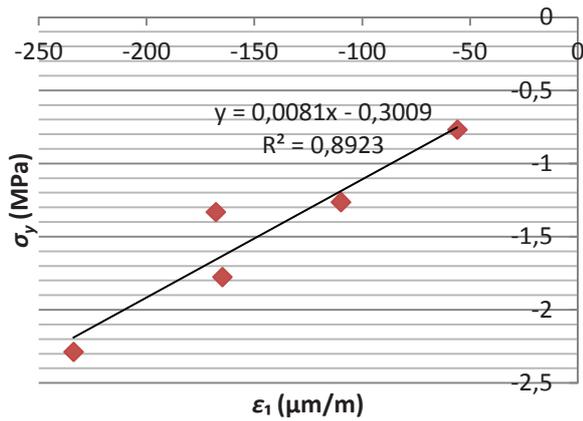
B1 Módulo Elástico E_y



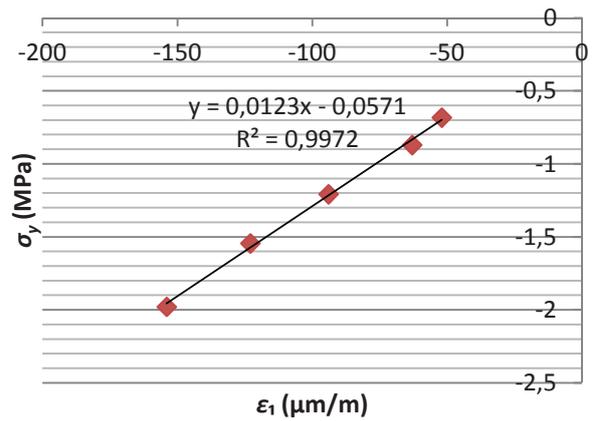
B2 Módulo Elástico E_y



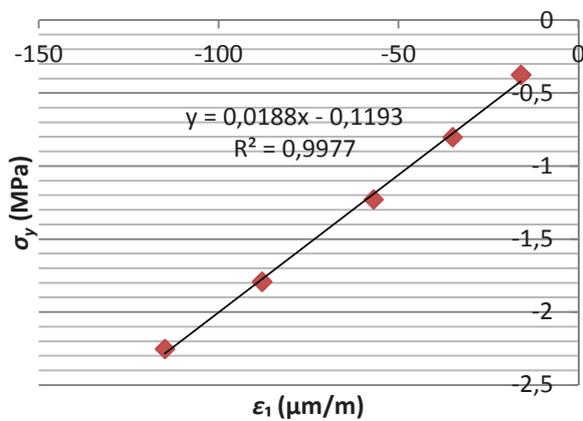
B3 Módulo Elástico E_y



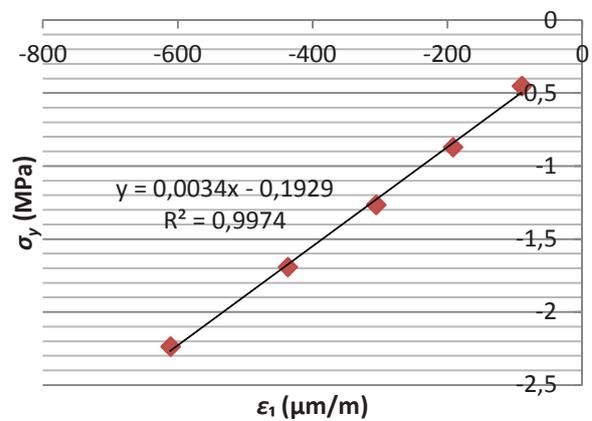
B4 Módulo Elástico E_y



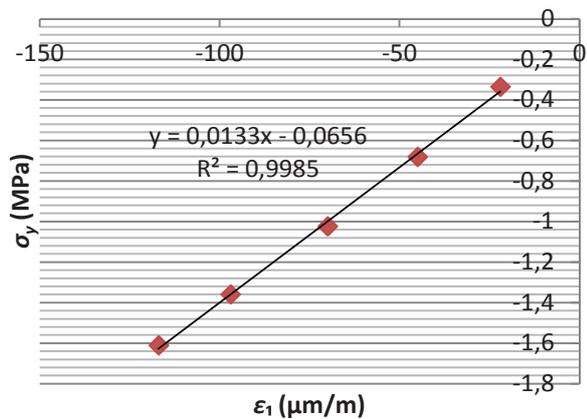
B5 Módulo Elástico E_y



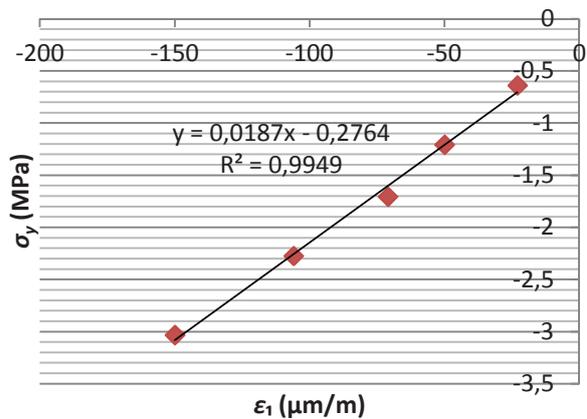
B6 Módulo Elástico E_y



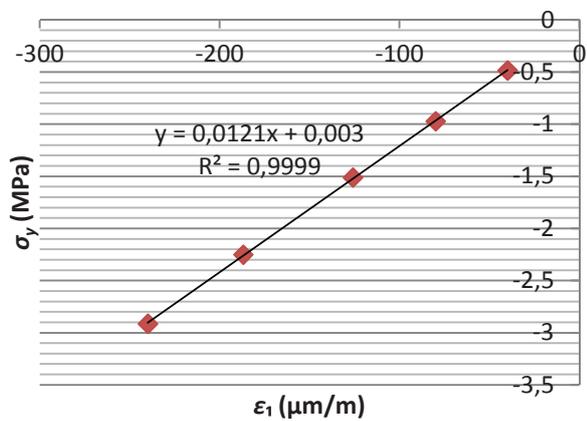
B7 Módulo Elástico E_y



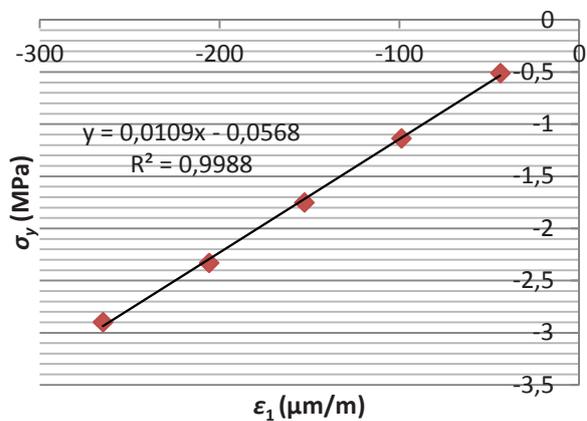
B8 Módulo Elástico E_y



B9 Módulo Elástico E_y



B10 Módulo Elástico E_y



Módulos de Elasticidad E_x
[Tablas]

| B1, compresión transversal a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -44,8 | -53,5 | -65 | -74,5 | -64,5 |
| σ_x (MPa) | -1,59 | -1,90 | -2,31 | -2,65 | -2,30 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -1155 | -2675 | -4645 | -6702 | -6205 |
| E_x (MPa) | 167 | | | | |

| B2, compresión transversal a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -11,5 | -20,5 | -35 | -58,5 | -50,5 |
| σ_x (MPa) | -0,44 | -0,78 | -1,33 | -2,22 | -1,92 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -252 | -423 | -938 | -2345 | -2321 |
| E_x (MPa) | 295 | | | | |

| B3, compresión transversal a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -17 | -27 | -37 | -45 | -56 |
| σ_x (MPa) | -0,60 | -0,96 | -1,32 | -1,60 | -1,99 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -761 | -1279 | -1800 | -2193 | -2722 |
| E_x (MPa) | 706 | | | | |

| B4, compresión transversal a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -17 | -27 | -37 | -45 | -56 |
| σ_x (MPa) | -0,60 | -0,96 | -1,32 | -1,60 | -1,99 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -761 | -1279 | -1800 | -2193 | -2722 |
| E_x (MPa) | 706 | | | | |

| B5, compresión transversal a las fibras | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -10,5 | -20,8 | -34 | -41 | -46 |
| σ_x (MPa) | -0,36 | -0,71 | -1,16 | -1,40 | -1,57 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -413 | -1024 | -2199 | -3055 | -4050 |
| E_x (MPa) | 332 | | | | |

B6, compresión transversal a las fibras

| | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -7,5 | -15,5 | -24 | -32 | -43 |
| σ_x (MPa) | -0,27 | -0,55 | -0,85 | -1,14 | -1,53 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -200 | -395 | -550 | -683 | -819 |
| E_x (MPa) | 2020 | | | | |

B7, compresión transversal a las fibras

| | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -9 | -19,5 | -29 | -40,5 | -50,5 |
| σ_x (MPa) | -0,31 | -0,66 | -0,99 | -1,38 | -1,72 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -266 | -604 | -911 | -1314 | -1716 |
| E_x (MPa) | 979 | | | | |

B8, compresión transversal a las fibras

| | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -7,5 | -16,5 | -25 | -48 | -56,5 |
| σ_x (MPa) | -0,26 | -0,57 | -0,86 | -1,66 | -1,95 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -585 | -1280 | -1941 | -3922 | -4513 |
| E_x (MPa) | 423 | | | | |

B9, compresión transversal a las fibras

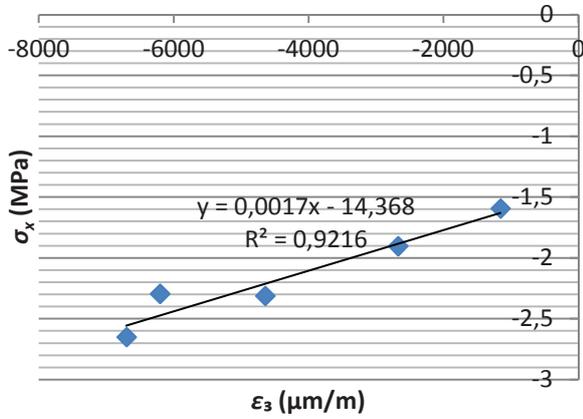
| | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -8 | -17 | -25,8 | -41,8 | -53,5 |
| σ_x (MPa) | -0,28 | -0,60 | -0,91 | -1,47 | -1,88 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -617 | -1406 | -2210 | -3230 | -3943 |
| E_x (MPa) | 482 | | | | |

B10, compresión transversal a las fibras

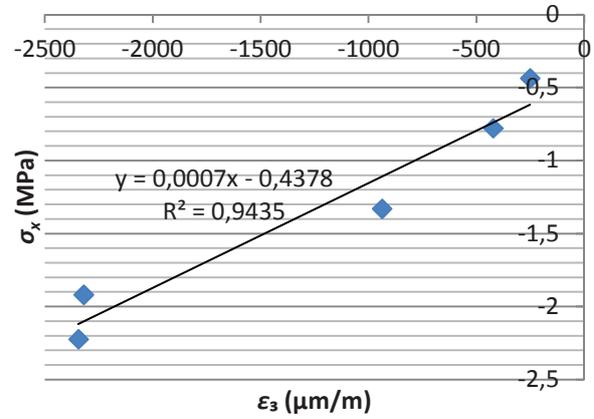
| | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga en máquina (kN) | -10 | -22,5 | -36 | -45,5 | -52 |
| σ_x (MPa) | -0,34 | -0,77 | -1,23 | -1,55 | -1,78 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -958 | -2080 | -3362 | -4020 | -4697 |
| E_x (MPa) | 387 | | | | |

Módulos de Elasticidad E_x
[Gráficos]

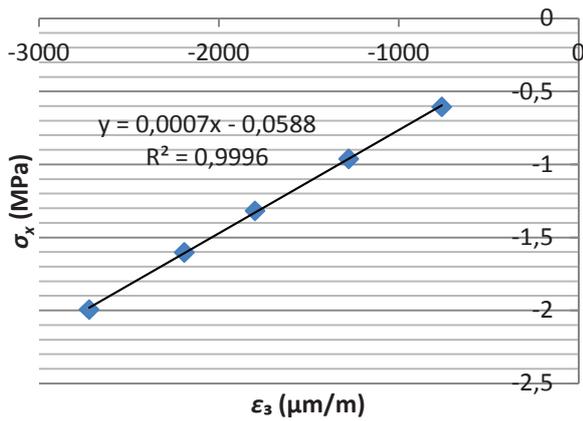
B1 Módulo Elástico E_x



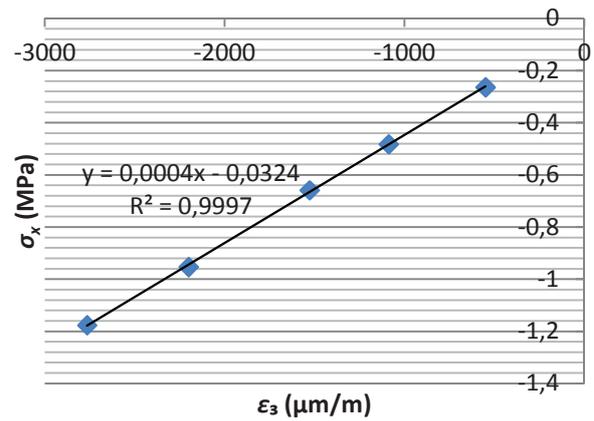
B2 Módulo Elástico E_x



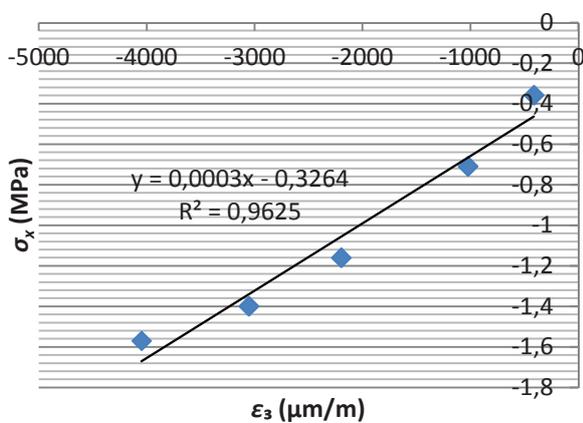
B3 Módulo Elástico E_x



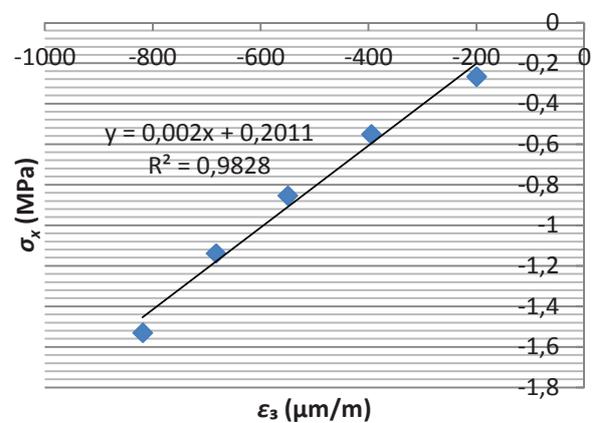
B4 Módulo Elástico E_x



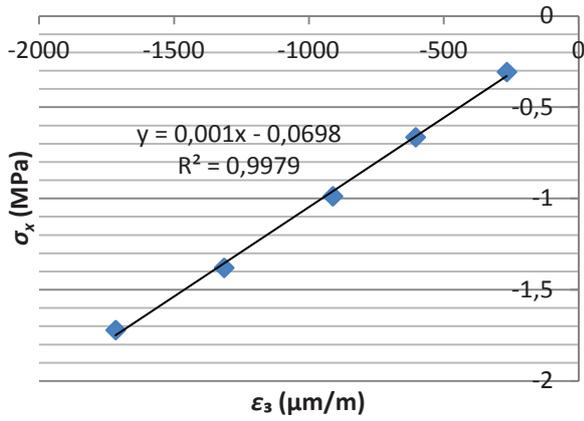
B5 Módulo Elástico E_x



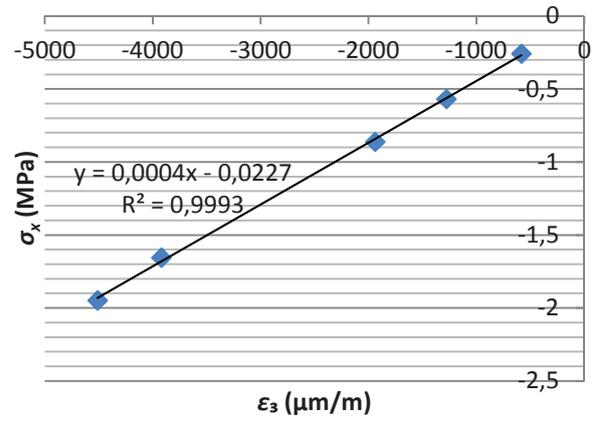
B6 Módulo Elástico E_x



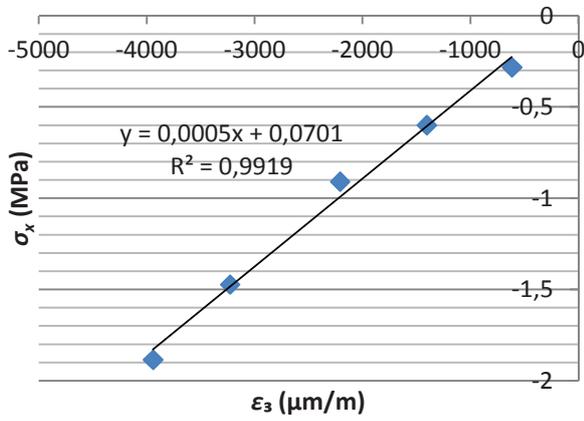
B7 Módulo Elástico E_x



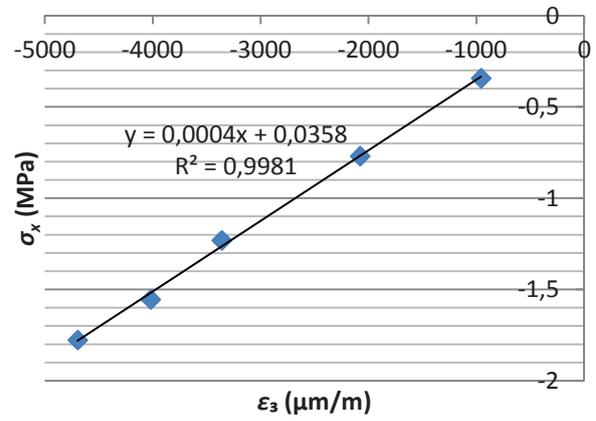
B8 Módulo Elástico E_x



B9 Módulo Elástico E_x

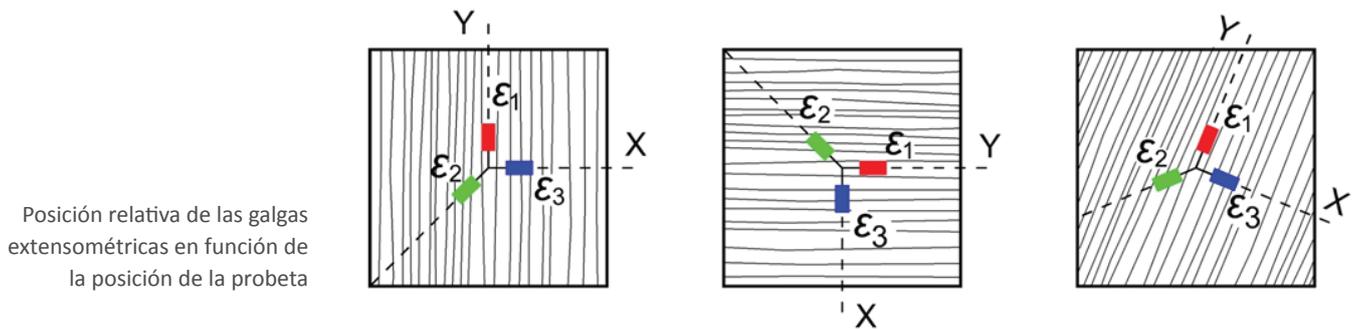


B10 Módulo Elástico E_x



Resultados Hole Drilling a Compresión

Se recuerda que en todos los casos, sea cual sea el tipo de compresión, las galgas extensométricas se ordenan según lo establecido en la Tesis Doctoral, siendo la deformación ϵ_1 la recogida en la dirección de las fibras, la deformación ϵ_2 la recogida por la galga ubicada en el bisector y la ϵ_3 la deformación recogida en la dirección perpendicular a las fibras de la madera.



Deformaciones de Hole Drilling en Compresión

[Tablas]

Resultados de las deformaciones de relajación captadas por las tres galgas tras la operación de Hole Drilling en las probetas originales con la carga paralela a la dirección de las fibras

| | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | B10 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| σ_y (Mpa) | -2,27 | -2,08 | -2,20 | -1,82 | -2,34 | -2,36 | -2,45 | -3,70 | -3,52 | -2,59 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 302 | 1779 | 101 | -68 | 601 | 1261 | 765 | 1181 | 770 | 731 |
| ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$) | 342 | 463 | -379 | 336 | 736 | 1243 | 471 | 10 | -100 | 413 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 829 | 442 | -280 | -515 | 250 | -295 | -81 | 57 | 105 | 467 |

Resultados de las deformaciones de relajación captadas por las tres galgas tras la operación de Hole Drilling en las probetas originales con la carga perpendicular a la dirección de las fibras

| | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | B10 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| σ_x (Mpa) | -2,30 | -2,66 | -2,38 | -1,96 | -2,40 | -2,37 | -2,20 | -2,70 | -2,73 | -2,52 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | -479 | -745 | -508 | -541 | -4 | 563 | 329 | 242 | 571 | 42 |
| ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$) | 740 | 834 | 305 | 41 | 974 | 692 | 1685 | 1188 | 1701 | 1266 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 2440 | 2754 | 807 | 707 | 3180 | 472 | 1662 | 2977 | 4343 | 2434 |

Resultados de las deformaciones de relajación captadas por las tres galgas tras la operación de Hole Drilling en las probetas especiales con la carga oblicua a la dirección de las fibras (Cara 1)

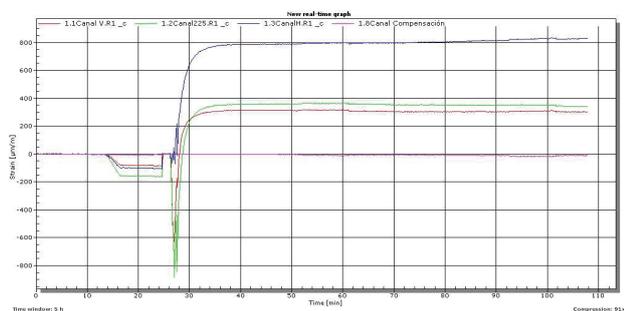
| | BO1.1 | BO1.2 | BO1.3 | BO1.4 | BO1.5 | BO1.6 | BO1.7 | BO1.8 | BO1.9 | BO1.10 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| β ($^\circ$) | 18 | 30 | 32 | 35 | 26 | 28 | 39 | 26 | 23,5 | 32 |
| σ_y (Mpa) | -4,17 | -4,95 | -4,13 | -4,21 | -4,05 | -3,96 | -4,22 | -4,50 | -4,22 | -4,29 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 1443 | 353 | 525 | -407 | 786 | 277 | 266 | 440 | 41 | 244 |
| ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$) | -816 | -1217 | -1660 | 300 | -1337 | -231 | -160 | -1266 | 136 | -141 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -304 | 819 | -1255 | 641 | 671 | 760 | 969 | 866 | 375 | 1288 |

Resultados de las deformaciones de relajación captadas por las tres galgas tras la operación de Hole Drilling en las probetas especiales con la carga oblicua a la dirección de las fibras (Cara 1)

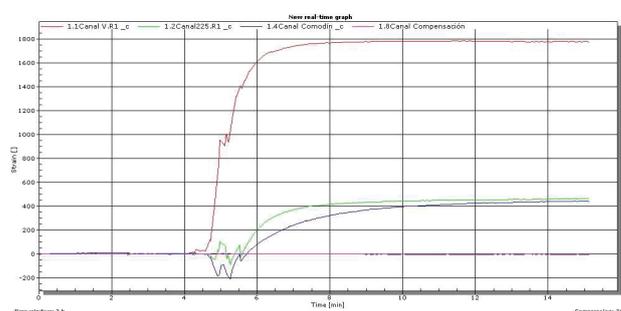
| | BO2.1 | BO2.2 | BO2.3 | BO2.4 | BO2.5 | BO2.6 | BO2.7 | BO2.8 | BO2.9 | BO2.10 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| β (°) | 20,5 | 27 | 31 | 35 | 26 | 34 | 39,5 | 27 | 25 | 32,5 |
| σ_Y (Mpa) | -4,17 | -4,03 | -4,32 | -4,21 | -4,05 | -3,98 | -4,26 | -4,31 | -4,76 | -4,34 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m}/\text{m}$) | 76 | 303 | -188 | -508 | 1024 | 972 | 364 | 341 | 555 | 396 |
| ϵ_2 ($\mu\text{m}/\text{m}$) | -684 | -550 | -16 | -548 | -959 | -807 | 11 | 608 | 109 | -27 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m}/\text{m}$) | 446 | 1322 | 971 | 1149 | -596 | 535 | 515 | 350 | 1672 | 810 |

Deformaciones de Hole Drilling Axial [Gráficos]

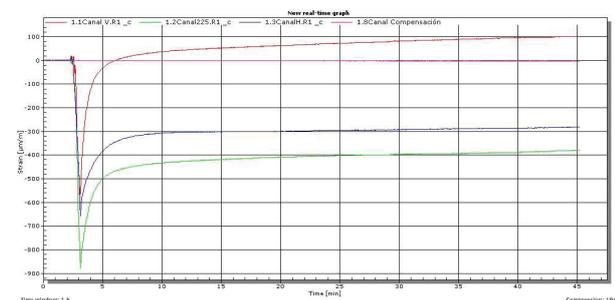
B1



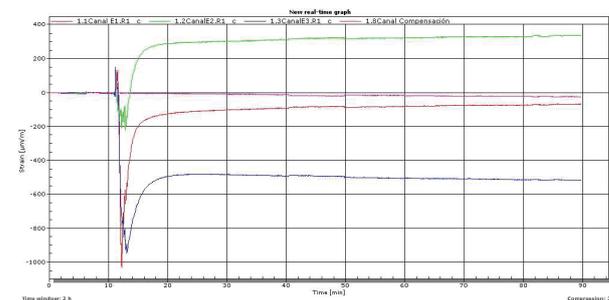
B2



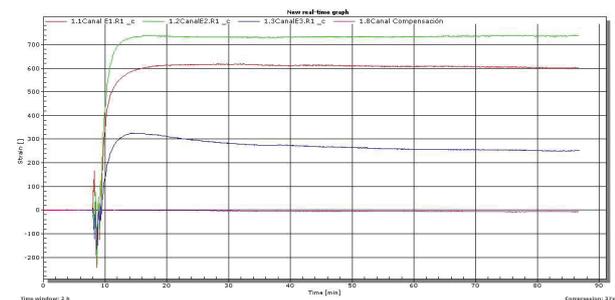
B3



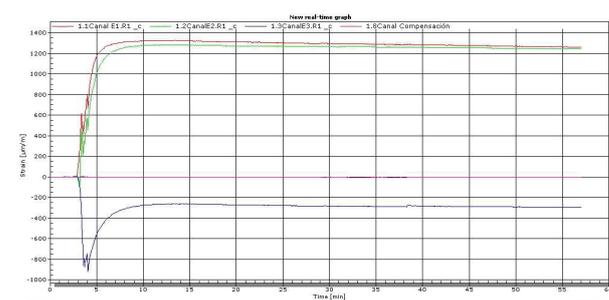
B4



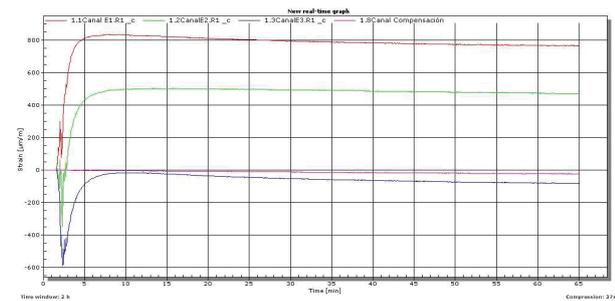
B5



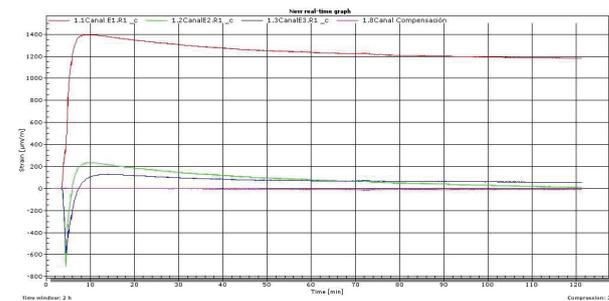
B6



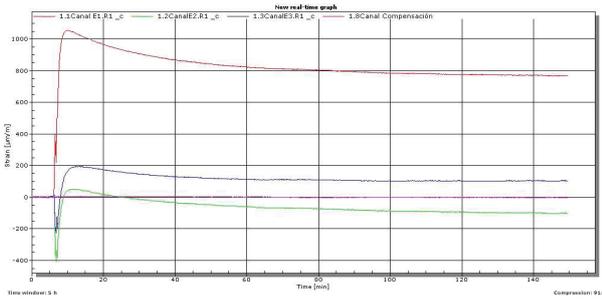
B7



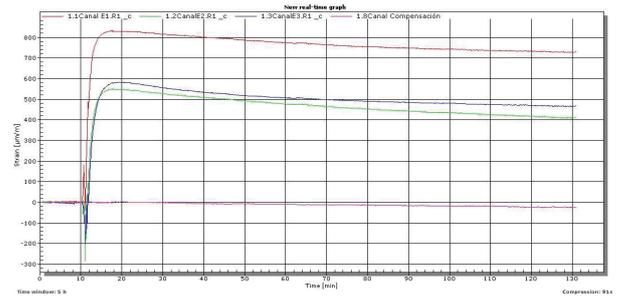
B8



B9

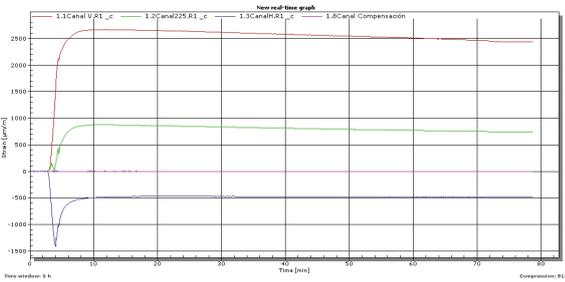


B10

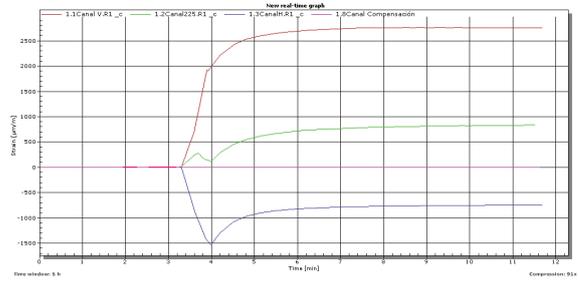


Deformaciones de Hole Drilling Perpendicular [Gráficos]

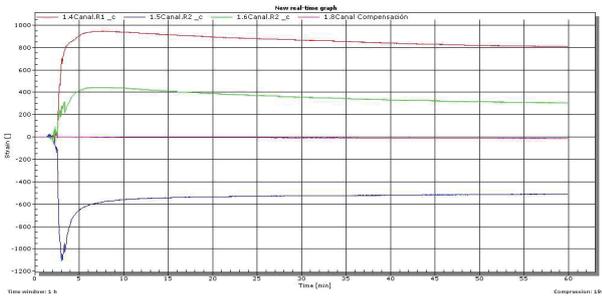
B1



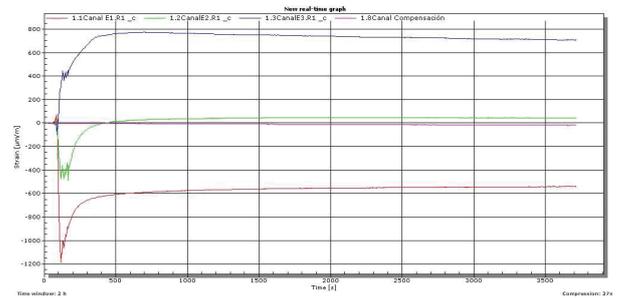
B2



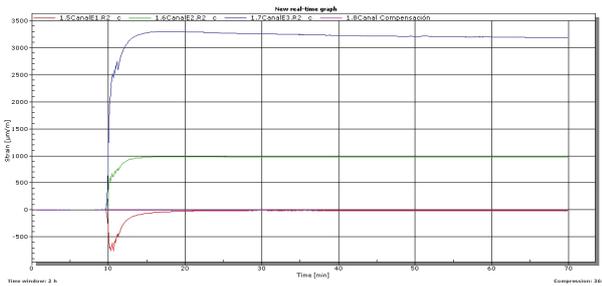
B3



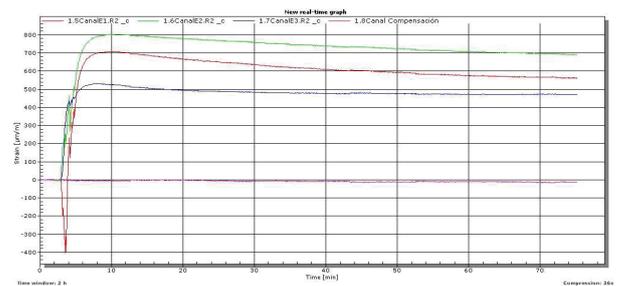
B4



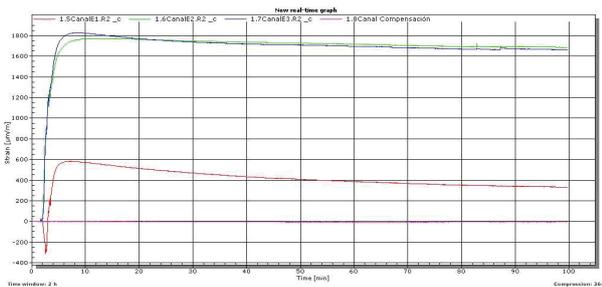
B5



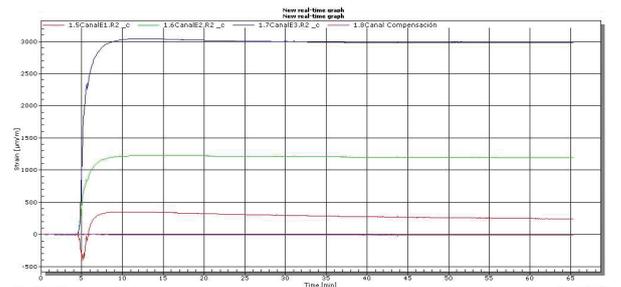
B6



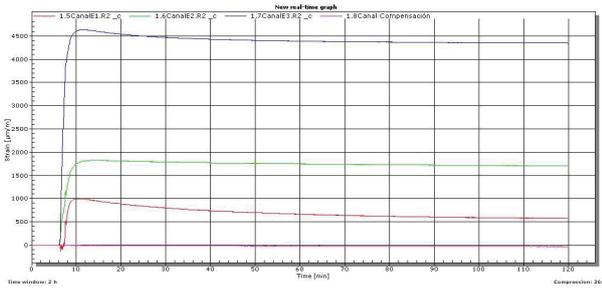
B7



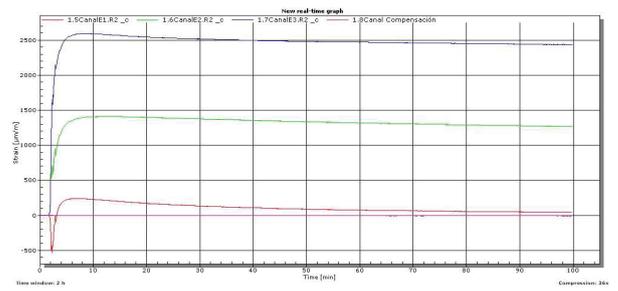
B8



B9

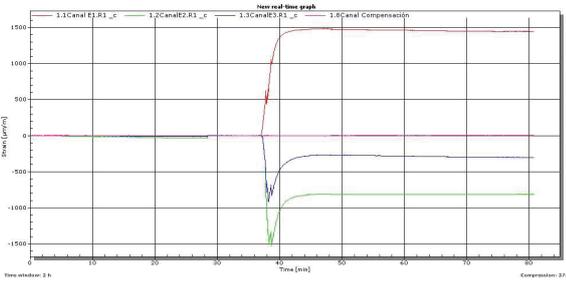


B10

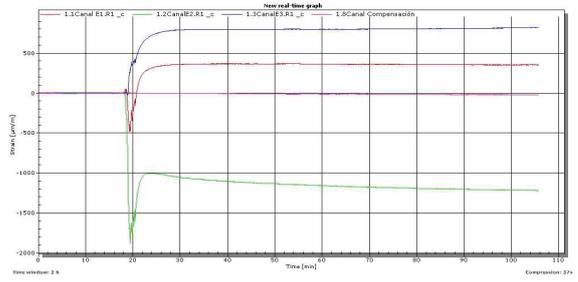


Deformaciones de Hole Drilling Oblicuo [Gráficos]

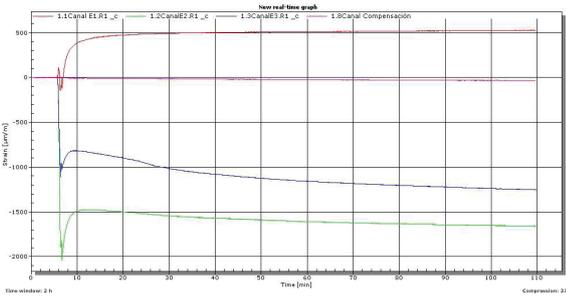
B01.1



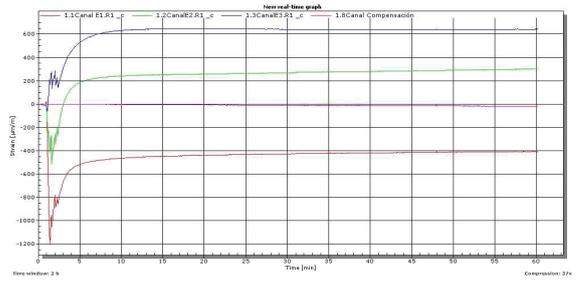
B01.2



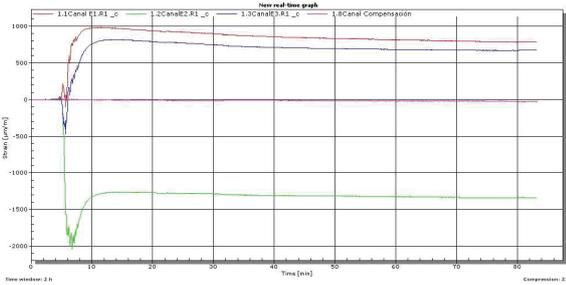
B01.3



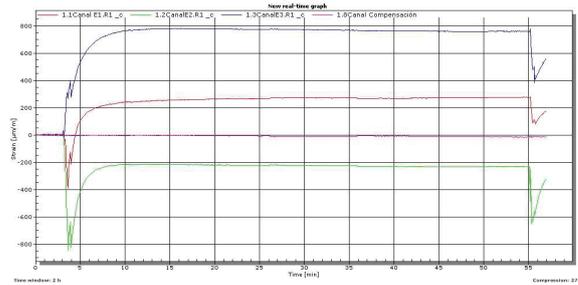
B01.4



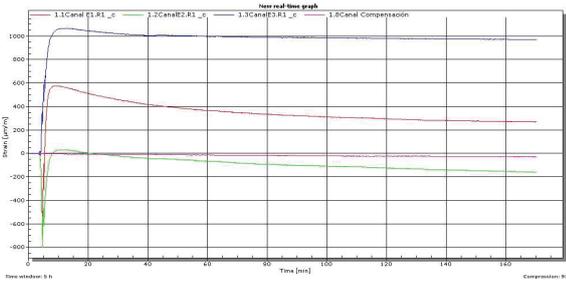
B01.5



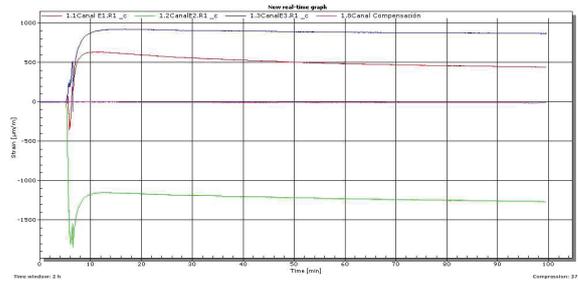
B01.6



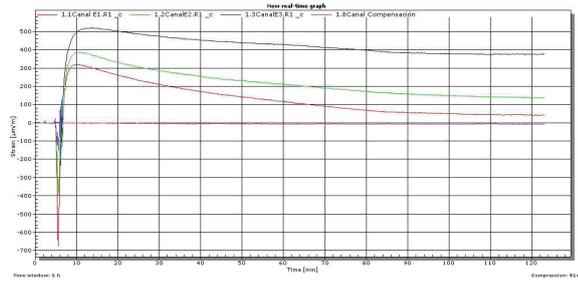
B01.7



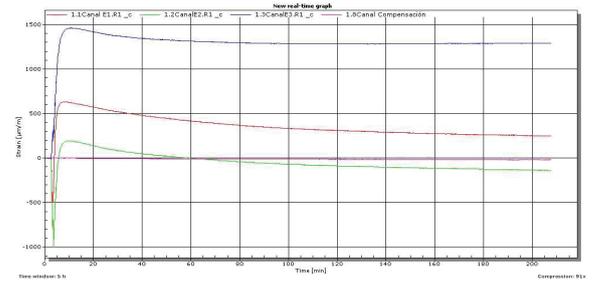
B01.8



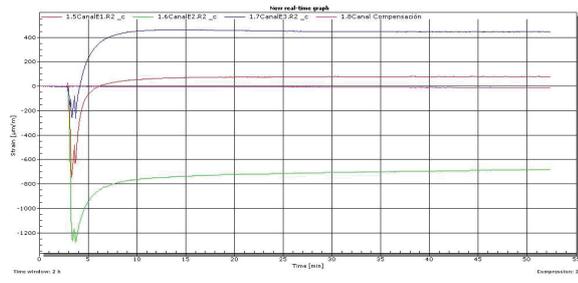
B01.9



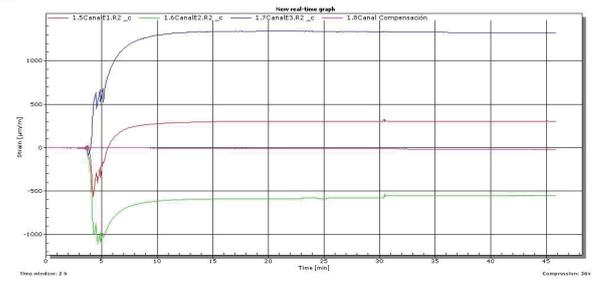
B01.10



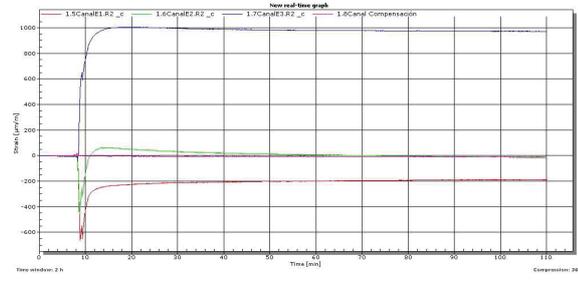
B02.1



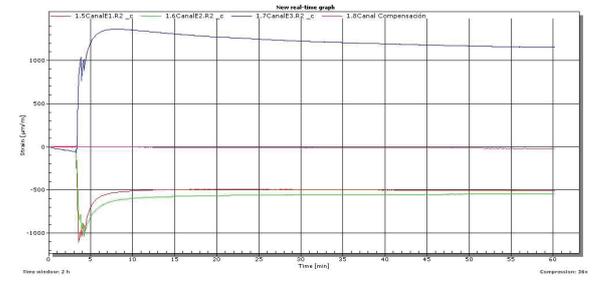
B02.2



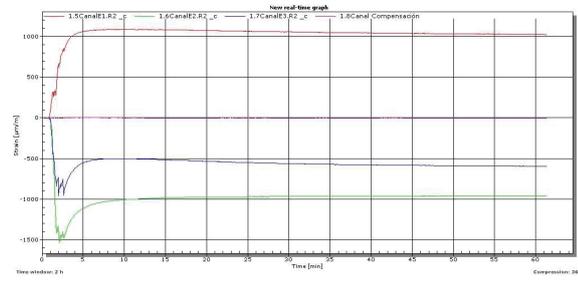
B02.3



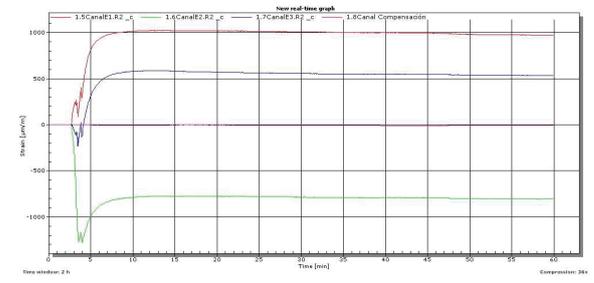
B02.4



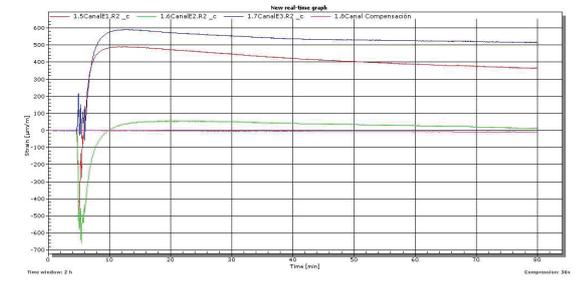
B02.5



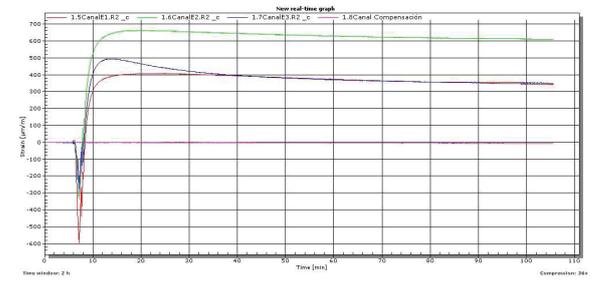
B02.6



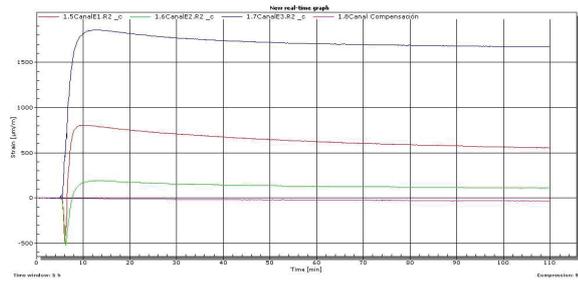
B02.7



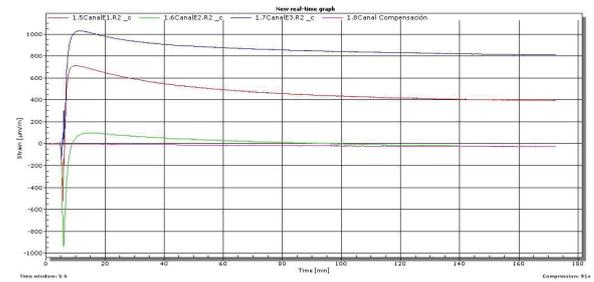
B02.8



B02.9



B02.10



Deformaciones de Hole Drilling en los ensayos de comprobación a Compresión Perpendicular [Tabla]

Probetas de comprobación sometidas a compresión perpendicular en el laboratorio de Donostia-San Sebastián

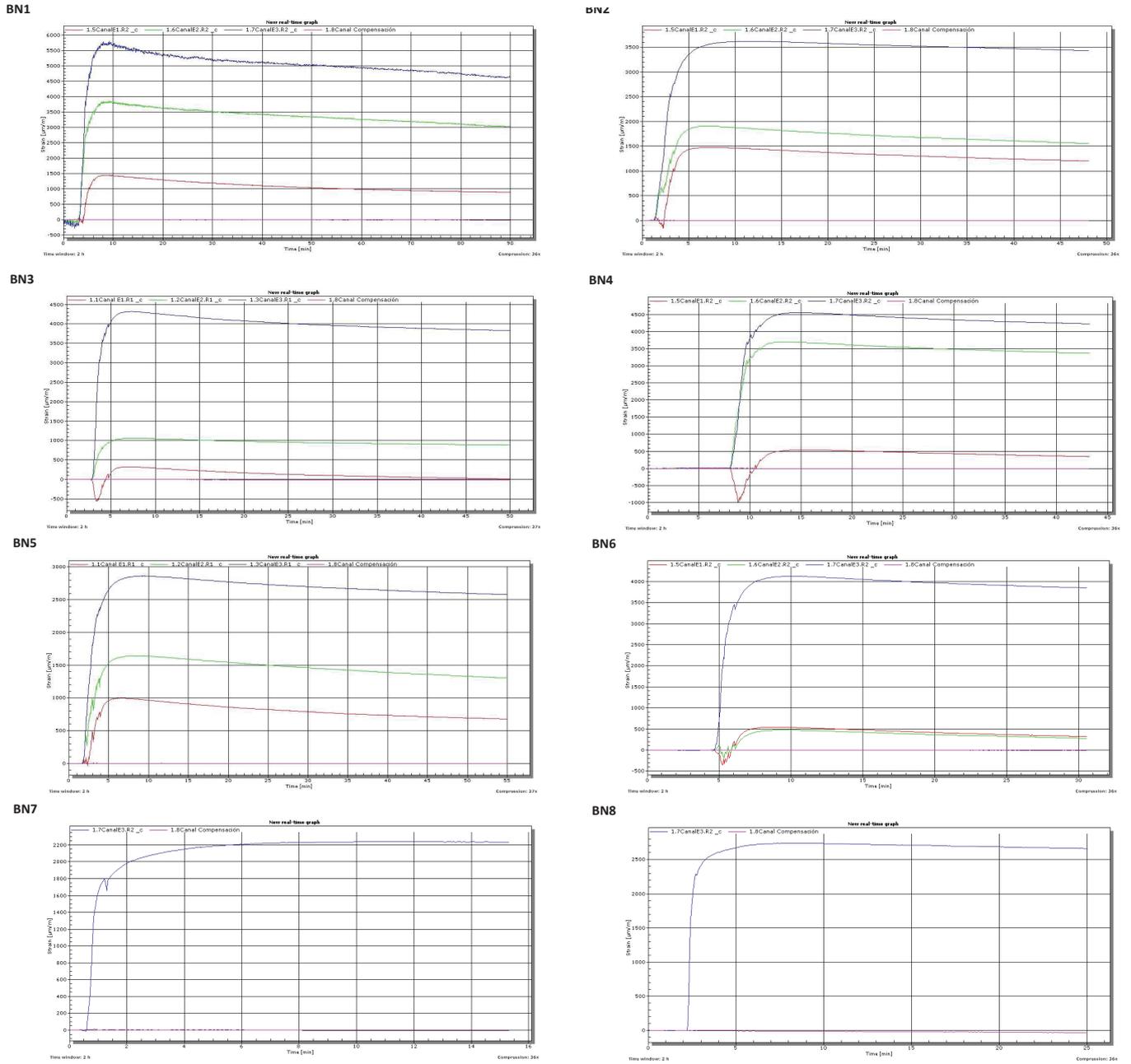


Resultados de las deformaciones de relajación captadas por las tres galgas tras la operación de Hole Drilling en las probetas de comprobación con la carga perpendicular a la dirección de las fibras

| | BN1 | BN2 | BN3 | BN4 | BN5 | BN6 | BN7 | BN8 |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| σ_x (Mpa) | -4,64 | -4,37 | -4,35 | -4,31 | -4,29 | -4,43 | -3,51 | -3,95 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m}/\text{m}$) | 894 | 1199 | 15 | 342 | 675 | 285 | - | - |
| ϵ_2 ($\mu\text{m}/\text{m}$) | 3022 | 1555 | 886 | 3365 | 1304 | 245 | - | - |
| ϵ_3 ($\mu\text{m}/\text{m}$) | 4620 | 3431 | 3822 | 4226 | 2579 | 3805 | 2235 | 2662 |

NOTA: En los ensayos de las probetas BN7 y BN8 solamente se han medido las deformaciones en la banda extensométrica *Gage 3*, debido a que las otras dos se pueden obviar en los ensayos de comprobación.

Deformaciones de Hole Drilling en los ensayos de comprobación a Compresión Perpendicular [Gráficos]



Anexo2: Resultados de los ensayos a Flexión

En el Capítulo 7 se estudiaron los datos obtenidos en la probeta PA1 como ejemplo para determinar el procedimiento de cálculo del módulo elástico E_y y de la probeta PP1 para el módulo elástico E_x . A continuación se recogen el resto de los datos correspondientes a todas las probetas analizadas en la Fase II de la parte experimental.

Fichas Probetas

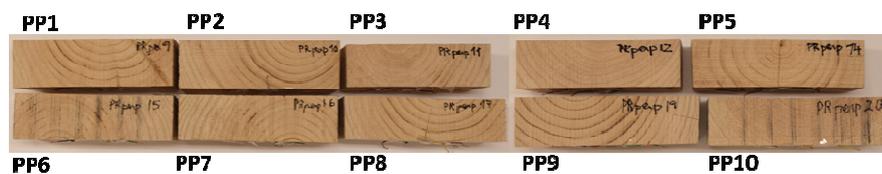
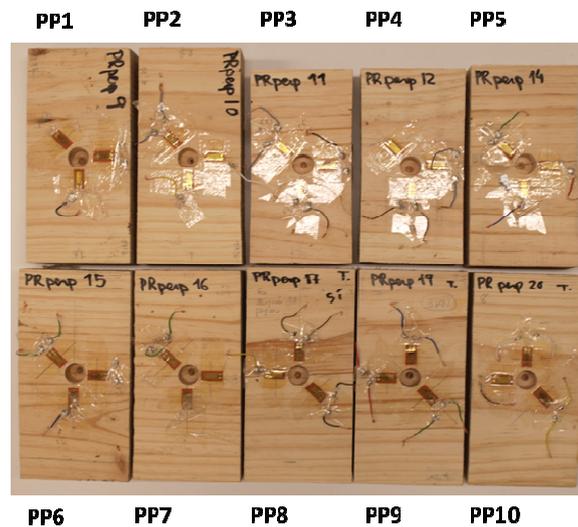
| Probetas Flexión Axial | | |
|----------------------------|--|--|
| Dimensiones [b x h x l] | 9 cm x 5 cm x 18 cm (aprox.) | |
| Carga puntual en máquina | $Q_{máq.} = 5 \text{ kN (x2)}$ | |
| Separación entre cargas | $d = 6 \text{ cm}$ | |
| Tensión máxima en el eje Y | $\sigma_y = 5,80 - 6,82 \text{ MPa}^*$ | |
| Número de ensayos | 11 | |



* Depende de la geometría de la probeta

Probetas Flexión Perpendicular

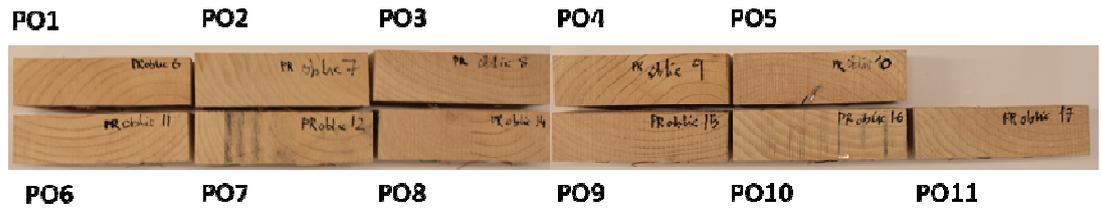
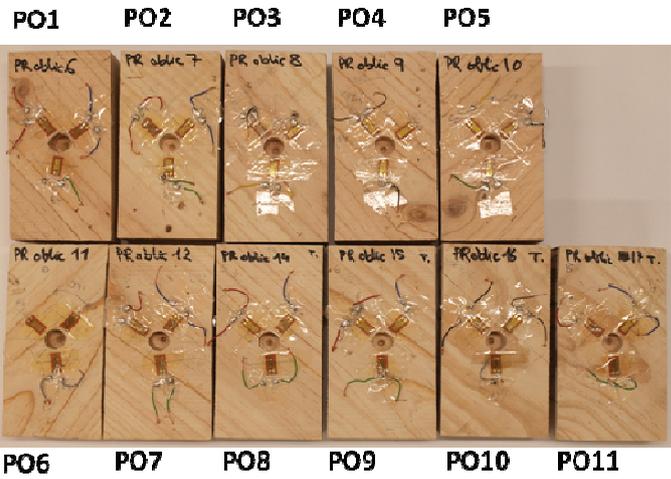
| | | |
|-----------------------------------|--|--|
| Dimensiones [b x h x l] | 9 cm x 5 cm x 18 cm (aprox.) | |
| Carga puntual en máquina | $Q_{m\grave{a}q.} = 2,5 \text{ kN (x2)}$ | |
| Separación entre cargas | $d = 6 \text{ cm}$ | |
| Tensión máxima en el eje X | $\sigma_x = 1,66 - 3,09 \text{ MPa}^*$ | |
| Número de ensayos | 10 | |



* Depende de la geometría de la probeta

Probetas Flexión Oblicua

| | | |
|---|---|--|
| Dimensiones [b x h x l] | 9 cm x 5 cm x 18 cm (aprox.) | |
| Carga puntual en máquina | $Q_{m\acute{a}q.} = 2,5 \text{ kN (x2)}$ | |
| Separación entre cargas | $d = 6 \text{ cm}$ | |
| Tensión uniaxial en el eje y' | $\sigma_{y'} = 2,82 - 3,33 \text{ MPa}^*$ | |
| Número de ensayos | 11 | |



* Depende de la geometría de la probeta

Resultados de los Módulos de Elasticidad a Flexión

Módulos de Elasticidad E_y
[Tablas]

| PA1, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|------------------------------------|-------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,22 | 2,43 | 3,65 | 4,87 | 6,08 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 128 | 240 | 352 | 464 | 583 |
| E_y (MPa) | 10724 | | | | |

| PA2, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,16 | 2,32 | 3,48 | 4,64 | 5,80 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 202 | 393 | 589 | 802 | 1022 |
| E_y (MPa) | 5660 | | | | |

| PA3, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,21 | 2,41 | 3,62 | 4,82 | 6,03 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 180 | 358 | 540 | 725 | 908 |
| E_y (MPa) | 6615 | | | | |

| PA4, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|------------------------------------|------|------|------|-------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,19 | 2,37 | 3,56 | 4,758 | 5,93 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 113 | 250 | 390 | 532 | 679 |
| E_y (MPa) | 8391 | | | | |

| PA5, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,36 | 2,73 | 4,09 | 5,46 | 6,82 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 217 | 418 | 614 | 810 | 1016 |
| E_y (MPa) | 6854 | | | | |

| PA6, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,14 | 2,28 | 3,43 | 4,57 | 5,72 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 116 | 232 | 348 | 465 | 580 |
| E_y (MPa) | 9846 | | | | |

| PA7, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|---|-------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,19 | 2,37 | 3,56 | 4,75 | 5,93 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 91 | 191 | 292 | 395 | 501 |
| E_y (MPa) | 11587 | | | | |

| PA8, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,16 | 2,32 | 3,48 | 4,64 | 5,80 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 164 | 353 | 552 | 753 | 957 |
| E_y (MPa) | 5844 | | | | |

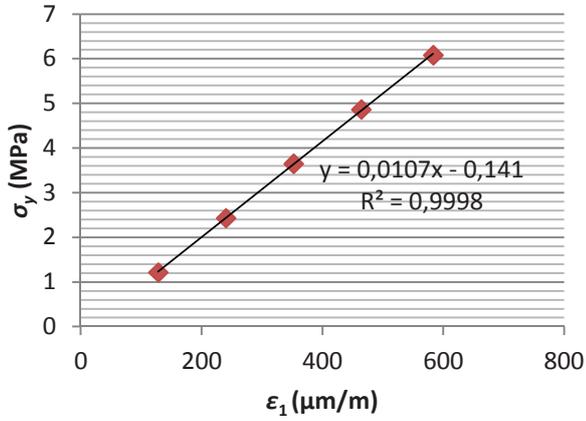
| PA9, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,30 | 2,60 | 3,91 | 5,21 | 6,51 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 90 | 214 | 344 | 479 | 617 |
| E_y (MPa) | 9870 | | | | |

| PA10, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,30 | 2,60 | 3,91 | 5,21 | 6,51 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 255 | 464 | 675 | 903 | 1133 |
| E_y (MPa) | 5930 | | | | |

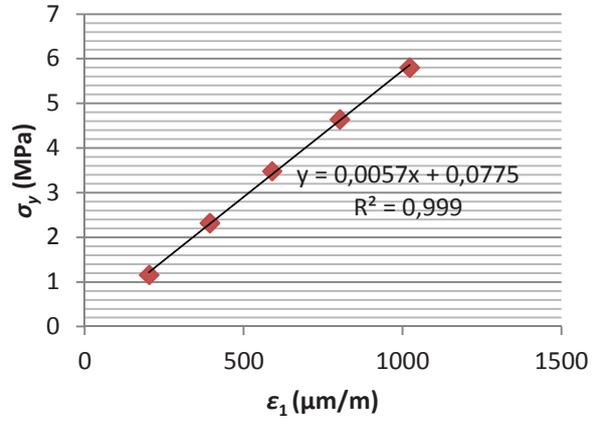
| PA11, flexión paralela a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Carga puntual (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_y (MPa) | 1,26 | 2,52 | 3,78 | 5,04 | 6,30 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 132 | 272 | 405 | 540 | 682 |
| E_y (MPa) | 9215 | | | | |

Módulos de Elasticidad E_y
[Gráficos]

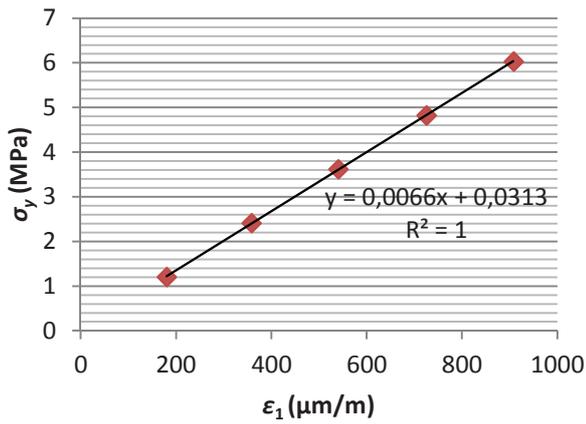
PA1 Módulo Elástico E_y



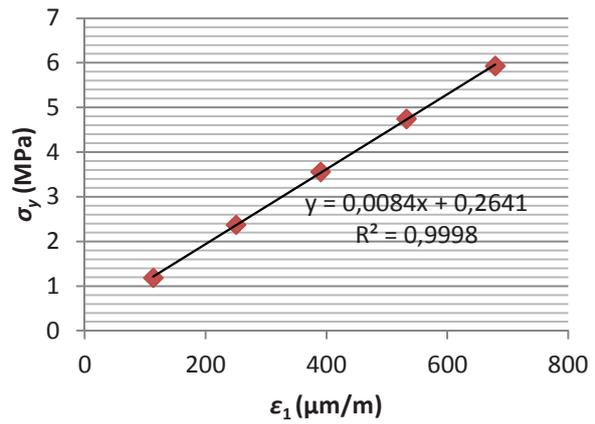
PA2 Módulo Elástico E_y



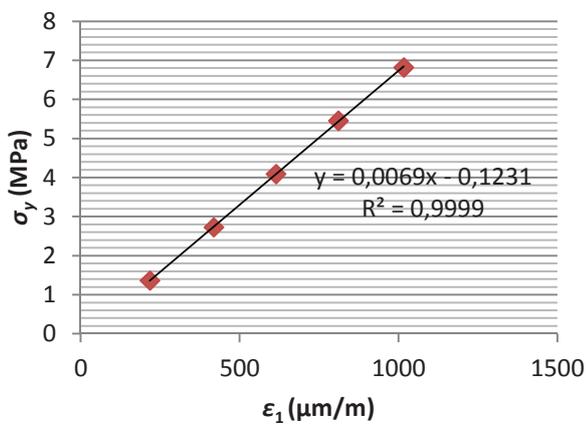
PA3 Módulo Elástico E_y



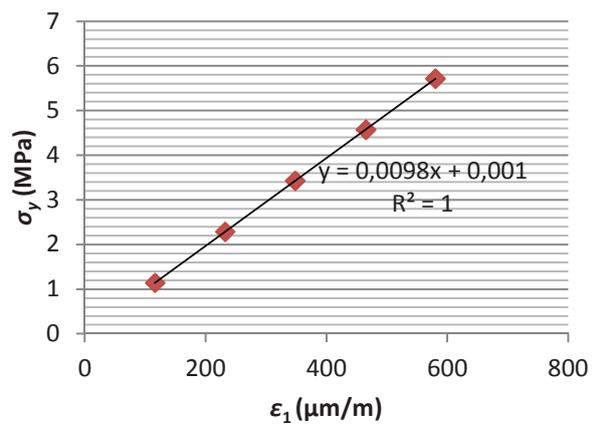
PA4 Módulo Elástico E_y



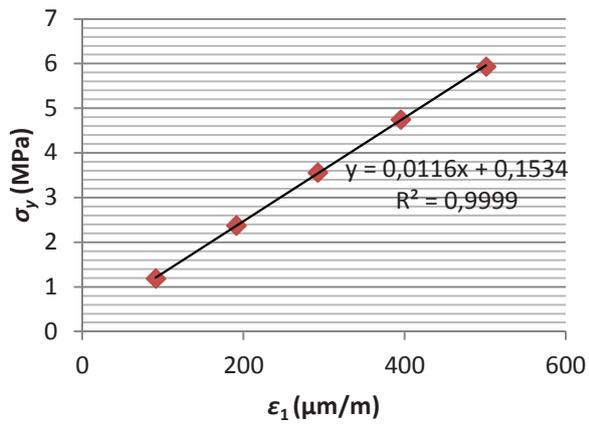
PA5 Módulo Elástico E_y



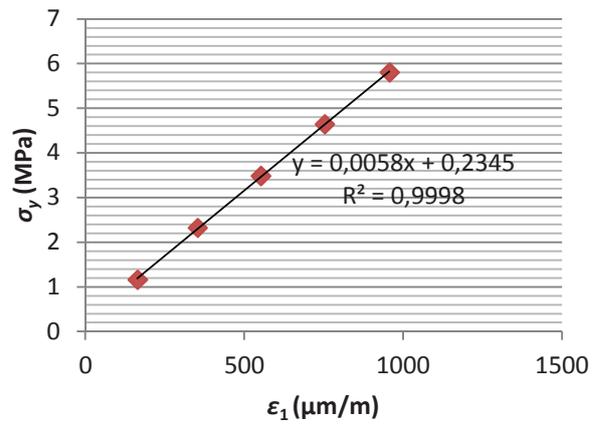
PA6 Módulo Elástico E_y



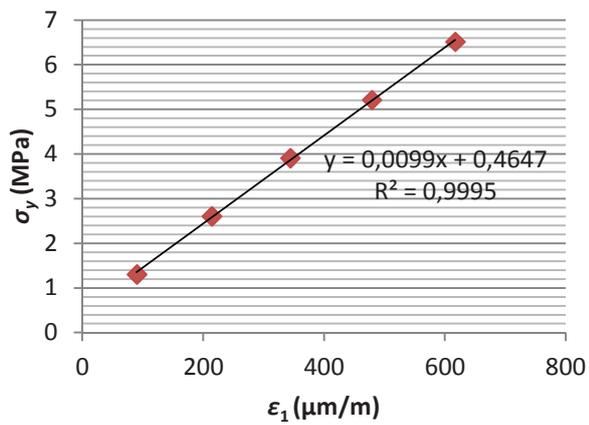
PA7 Módulo Elástico E_y



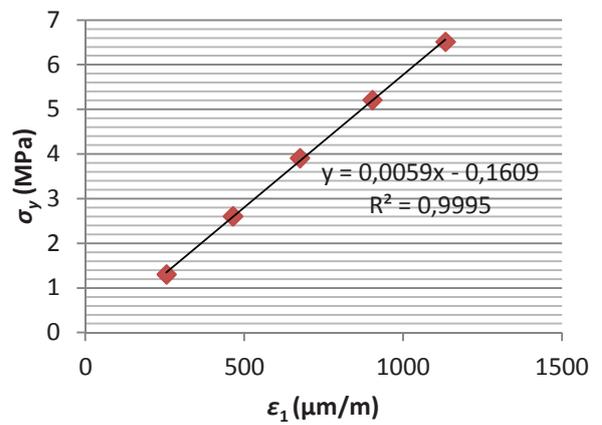
PA8 Módulo Elástico E_y



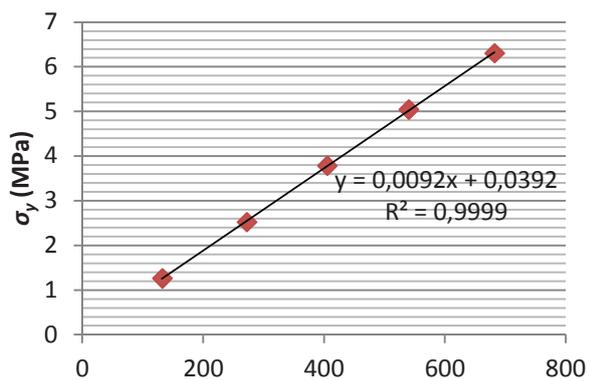
PA9 Módulo Elástico E_y



PA10 Módulo Elástico E_y



PA11 Módulo Elástico E_y



| PP1, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Carga puntual (kN) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| σ_x (MPa) | 0,47 | 0,94 | 1,42 | 1,89 | 2,36 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 1049 | 2102 | 3057 | 4020 | 5046 |
| E_x (MPa) | 476 | | | | |

| PP2, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Carga puntual (kN) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| σ_x (MPa) | 0,46 | 0,93 | 1,39 | 1,85 | 2,31 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 1039 | 2075 | 3081 | 4078 | 5125 |
| E_x (MPa) | 455 | | | | |

| PP3, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Carga puntual (kN) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| σ_x (MPa) | 0,62 | 1,24 | 1,86 | 2,47 | 3,09 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 940 | 2089 | 3380 | 4610 | 6031 |
| E_x (MPa) | 486 | | | | |

| PP4, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Carga puntual (kN) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| σ_x (MPa) | 0,60 | 1,19 | 1,79 | 2,38 | 2,98 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 743 | 1628 | 2527 | 3470 | 4494 |
| E_x (MPa) | 637 | | | | |

| PP5, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Carga puntual (kN) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| σ_x (MPa) | 0,57 | 1,15 | 1,72 | 2,30 | 2,87 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 775 | 1635 | 2503 | 3388 | 4327 |
| E_x (MPa) | 648 | | | | |

| PP6, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Carga puntual (kN) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| σ_x (MPa) | 0,51 | 1,01 | 1,52 | 2,02 | 2,53 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 1130 | 2170 | 3180 | 4180 | 5224 |
| E_x (MPa) | 496 | | | | |

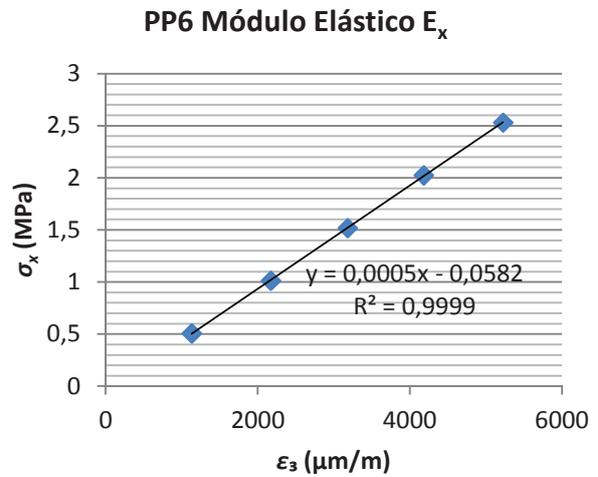
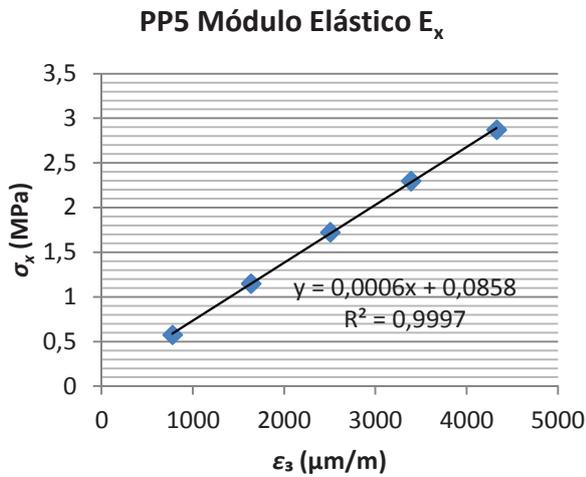
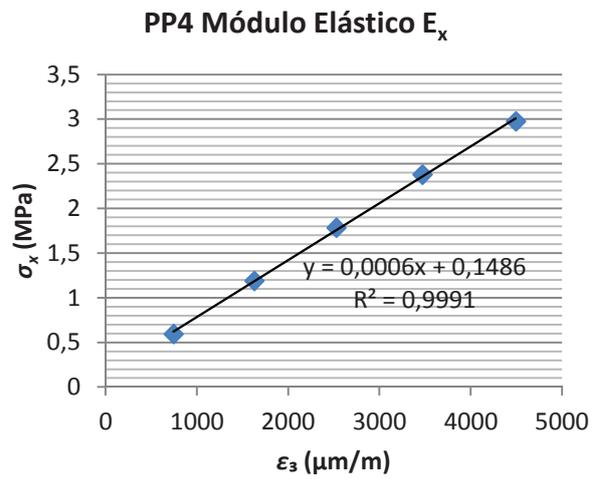
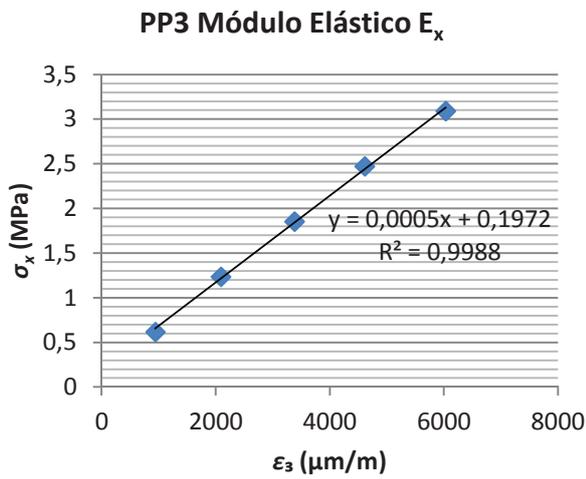
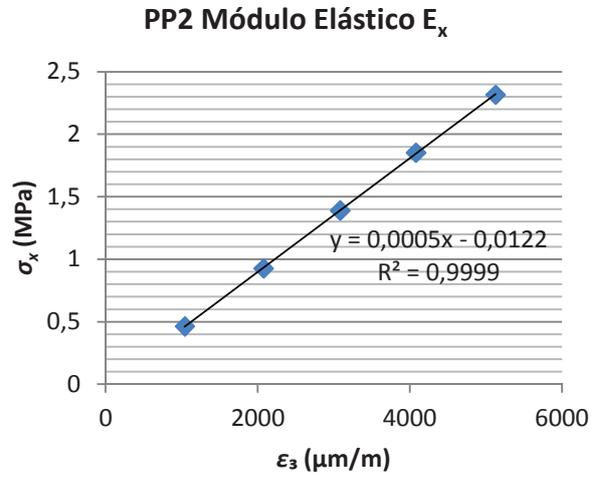
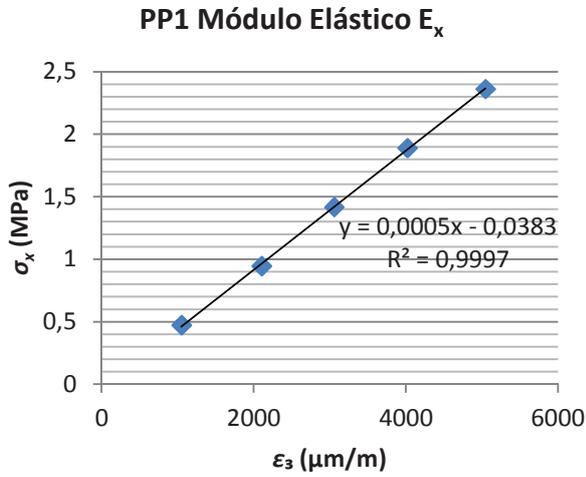
| PP7, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Carga puntual (kN) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| σ_x (MPa) | 0,52 | 1,03 | 1,55 | 2,07 | 2,59 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 530 | 1006 | 1493 | 1989 | 2506 |
| E_x (MPa) | 1048 | | | | |

| PP8, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Carga puntual (kN) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| σ_x (MPa) | 0,55 | 1,11 | 1,66 | 2,21 | 2,77 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 948 | 1795 | 2620 | 3439 | 4287 |
| E_x (MPa) | 665 | | | | |

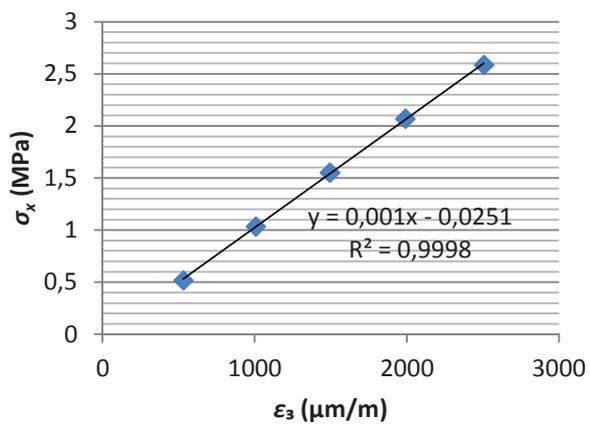
| PP9, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3 |
| Carga puntual (kN) | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,5 |
| σ_x (MPa) | 0,33 | 0,66 | 1,00 | 1,33 | 1,66 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 480 | 1018 | 1576 | 2170 | 2788 |
| E_x (MPa) | 575 | | | | |

| PP10, flexión perpendicular a las fibras | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Carga en máquina (kN) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Carga puntual (kN) | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| σ_x (MPa) | 0,60 | 1,20 | 1,81 | 2,41 | 3,01 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 1235 | 2310 | 3373 | 4438 | 5549 |
| E_x (MPa) | 559 | | | | |

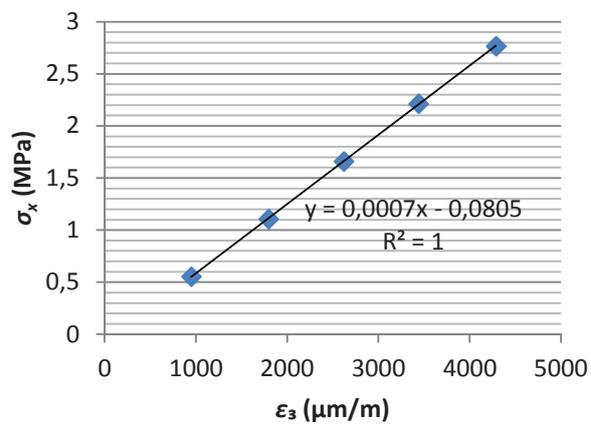
Módulos de Elasticidad E_x
[Gráficos]



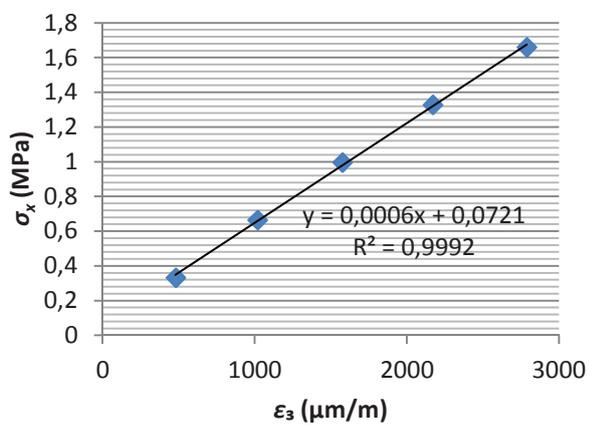
PP7 Módulo Elástico E_x



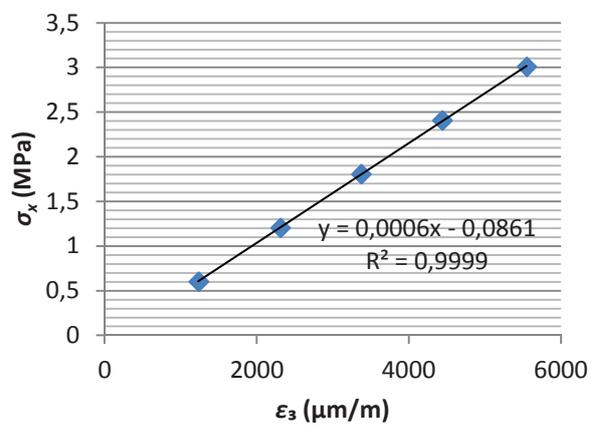
PP8 Módulo Elástico E_x



PP9 Módulo Elástico E_x

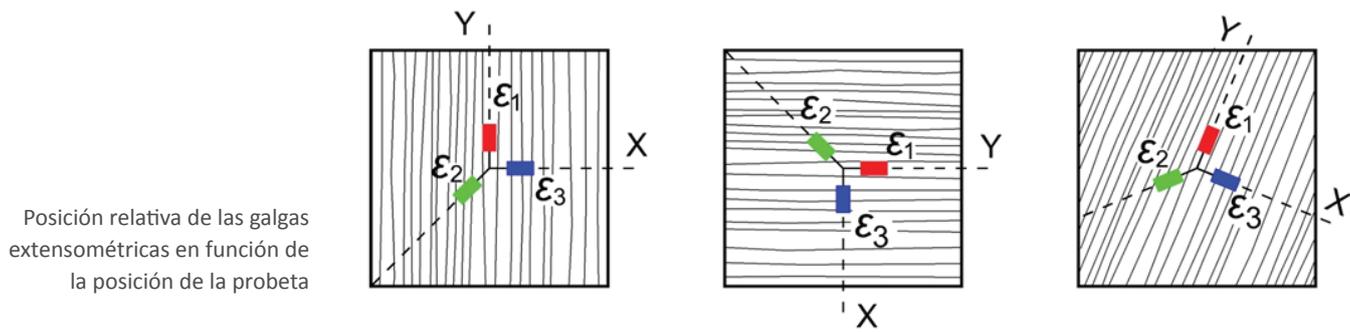


PP10 Módulo Elástico E_x



Resultados Hole Drilling a Flexión

Se recuerda que en todos los casos, sea cual sea el tipo de flexión, las galgas extensométricas se ordenan según lo establecido en la Tesis Doctoral, siendo la deformación ϵ_1 la recogida en la dirección de las fibras, la deformación ϵ_2 la recogida por la galga ubicada en el bisector y la ϵ_3 la deformación recogida en la dirección perpendicular a las fibras de la madera. Todos los ensayos de Hole Drilling fueron realizados en la cara de máxima tracción.



Deformaciones de Hole Drilling en Flexión

[Tablas]

Resultados de las deformaciones de relajación captadas por las tres galgas tras la operación de Hole Drilling en las probetas axiales con la tensión actuando en la dirección de las fibras

| | PA1 | PA2 | PA3 | PA4 | PA5 | PA6 | PA7 | PA8 | PA9 | PA10 | PA11 |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| σ_y (Mpa) | 6,08 | 5,80 | 6,03 | 5,93 | 6,82 | 5,72 | 5,93 | 5,80 | 6,51 | 6,51 | 6,30 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | -440 | -976 | -658 | -281 | -665 | -393 | -149 | -586 | -387 | -940 | -487 |
| ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$) | 215 | -279 | 113 | 153 | -77 | 397 | -21 | -210 | -73 | -286 | -278 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 800 | 630 | 502 | 606 | 690 | 874 | 561 | 243 | 400 | 329 | 150 |

Resultados de las deformaciones de relajación captadas por las tres galgas tras la operación de Hole Drilling en las probetas perpendiculares con la tensión actuando en la dirección perpendicular a las fibras

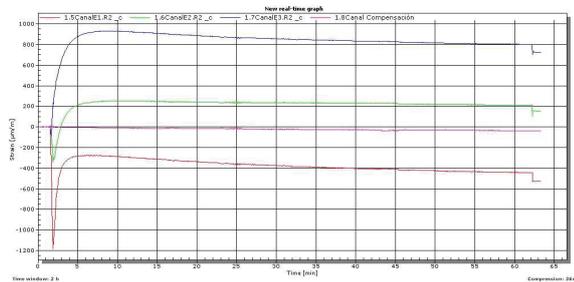
| | PP1 | PP2 | PP3 | PP4 | PP5 | PP6 | PP7 | PP8 | PP9 | PP10 |
|----------------------------------|-------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|
| σ_x (Mpa) | 2,39 | 2,31 | 3,09 | 2,98 | 2,87 | 2,53 | 2,59 | 2,77 | 1,66 | 3,01 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | 252 | 455 | 281 | 208 | 340 | 793 | 1106 | 620 | -408 | 292 |
| ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$) | -796 | -590 | -22 | -590 | -305 | 344 | 720 | -420 | -296 | -343 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | -1522 | -937 | -960 | -1101 | -675 | -417 | -548 | -1010 | -640 | -880 |

Resultados de las deformaciones de relajación captadas por las tres galgas tras la operación de Hole Drilling en las probetas con las fibras oblicuas respecto a la dirección de la tensión

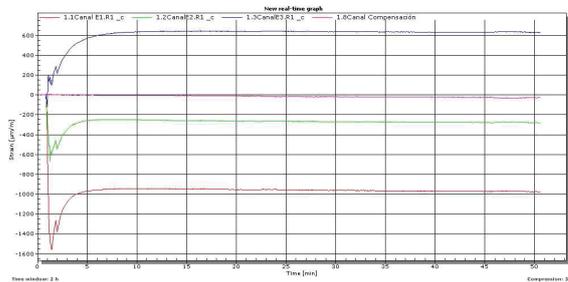
| | PO1 | PO2 | PO3 | PO4 | PO5 | PO6 | PO7 | PO8 | PO9 | PO10 | PO11 |
|----------------------------------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| β ($^\circ$) | 37 | 45 | 40 | 38 | 49 | 39 | 54 | 49 | 47 | 47 | 50 |
| σ_y (Mpa) | 3,33 | 2,82 | 3,13 | 2,91 | 3,02 | 3,21 | 2,87 | 2,95 | 2,95 | 2,95 | 2,85 |
| ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$) | -684 | -2 | -480 | -601 | 241 | -61 | -101 | -596 | -157 | -77 | -387 |
| ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$) | -1160 | -505 | -734 | -882 | -569 | -974 | -866 | -1013 | -920 | -694 | -417 |
| ϵ_3 ($\mu\text{m/m}$) | 40 | -71 | 13 | 151 | -548 | -523 | -1071 | -139 | -500 | 316 | 94 |

Deformaciones de Hole Drilling en las Probetas Axiales [Gráficos]

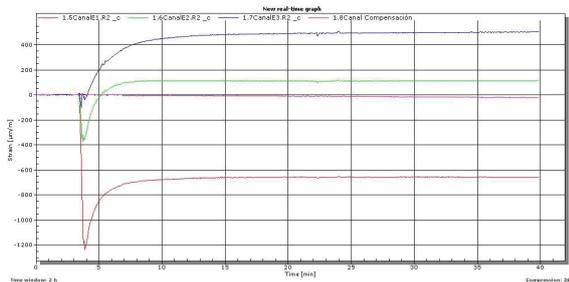
PA1



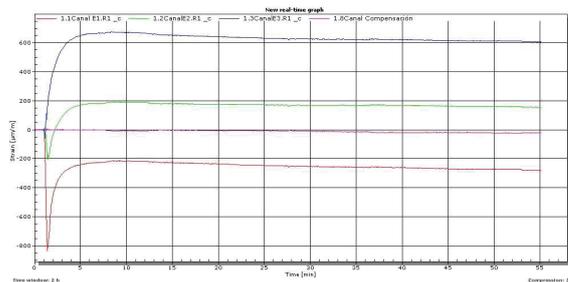
PA2



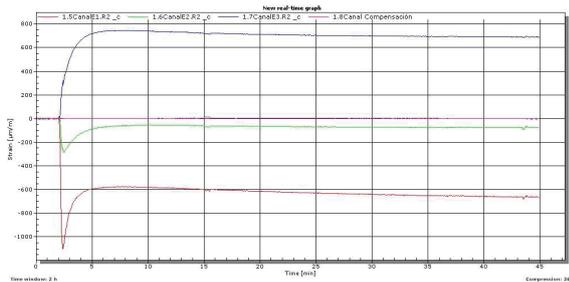
PA3



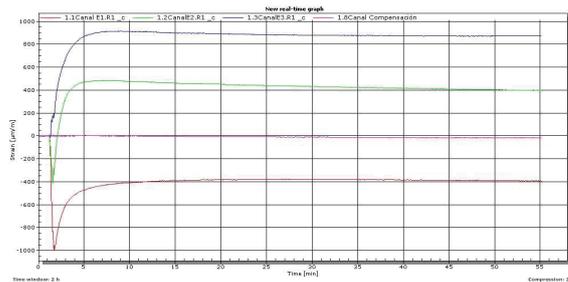
PA4



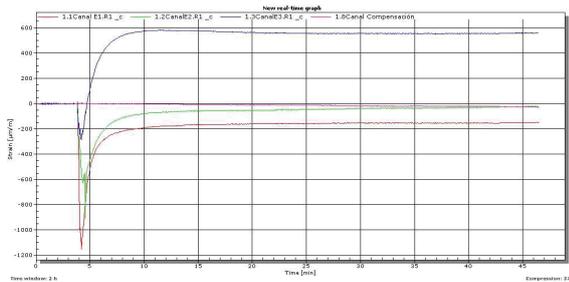
PA5



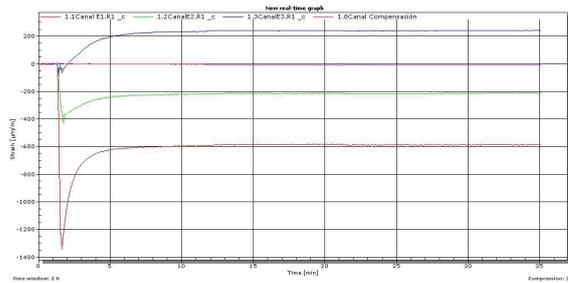
PA6



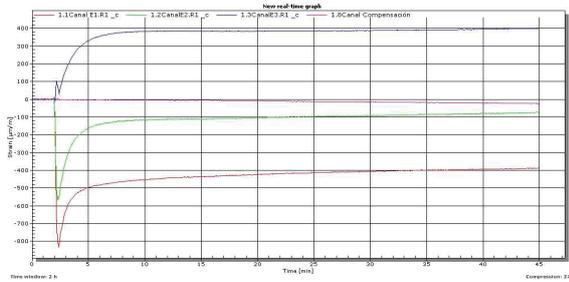
PA7



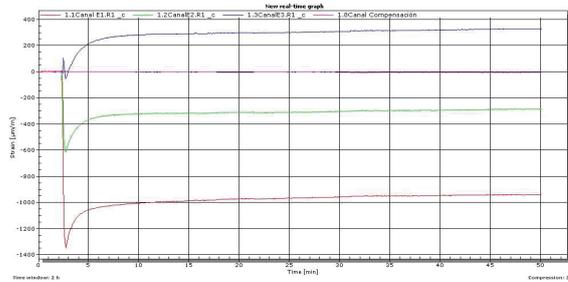
PA8



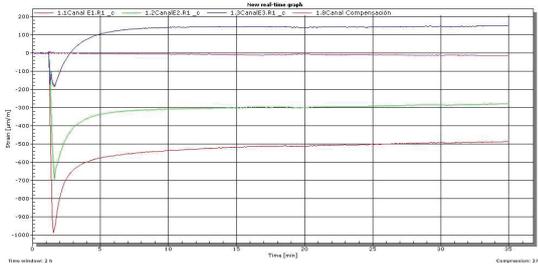
PA9



PA10



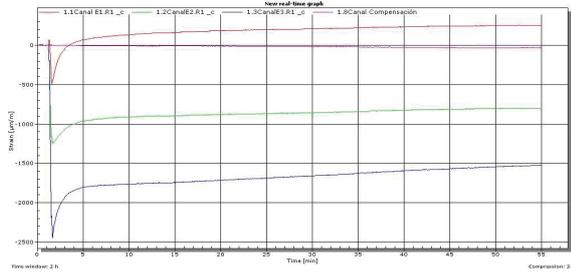
PA11



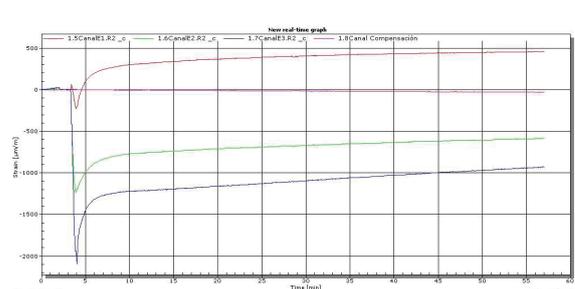
Deformaciones de Hole Drilling en las Probetas Perpendiculares

[Gráficos]

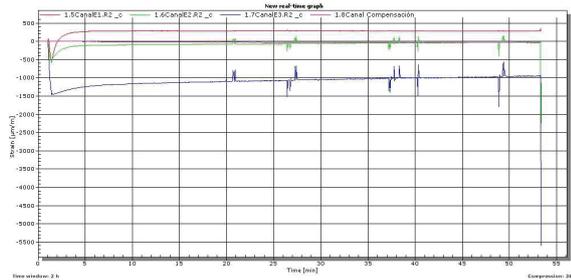
PP1



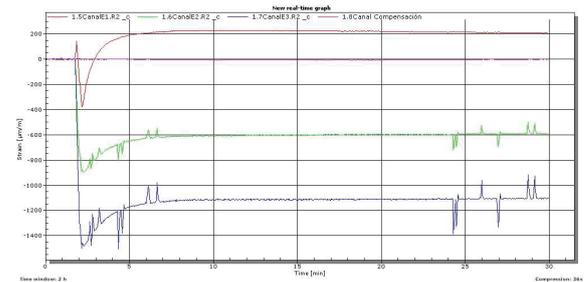
PP2



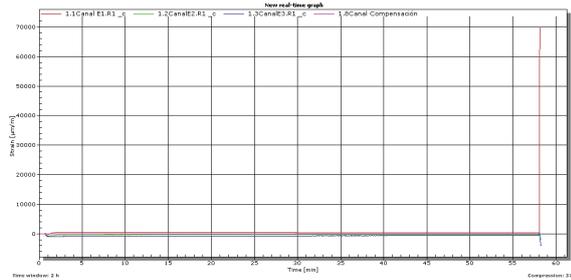
PP3



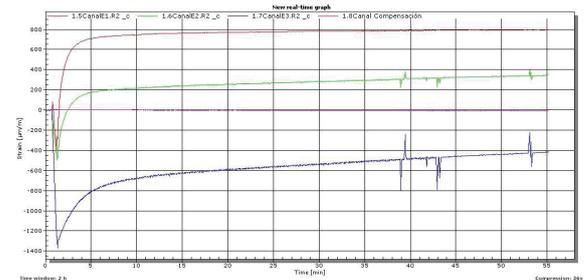
PP4



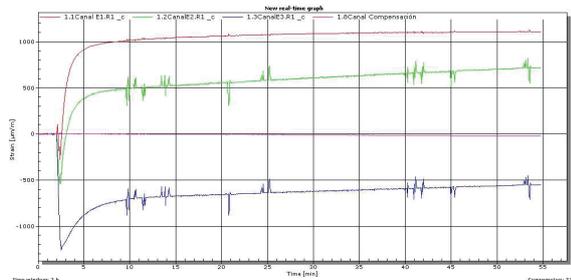
PP5



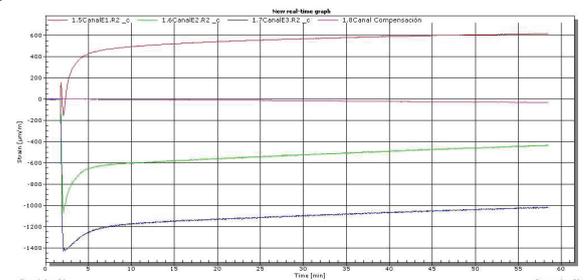
PP6



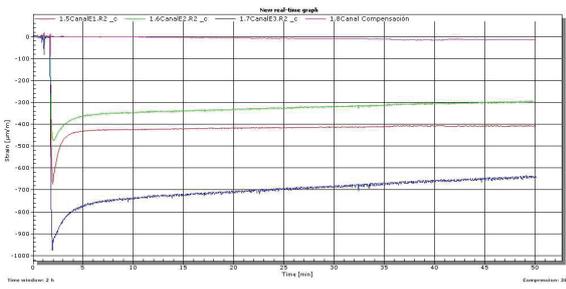
PP7



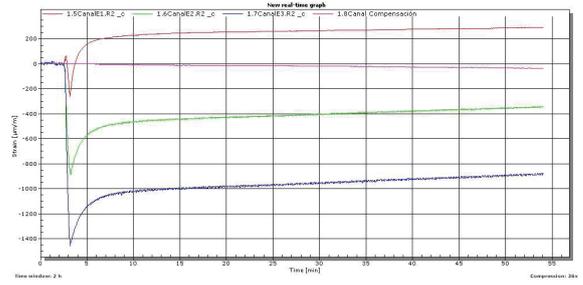
PP8



PP9

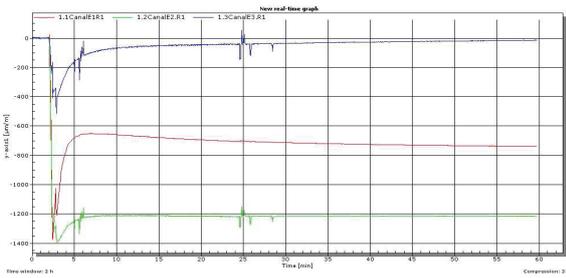


PP10

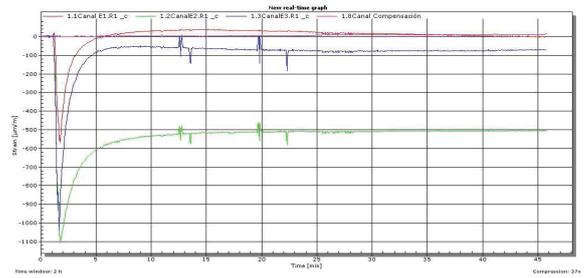


Deformaciones de Hole Drilling en las Probetas Oblicuas [Gráficos]

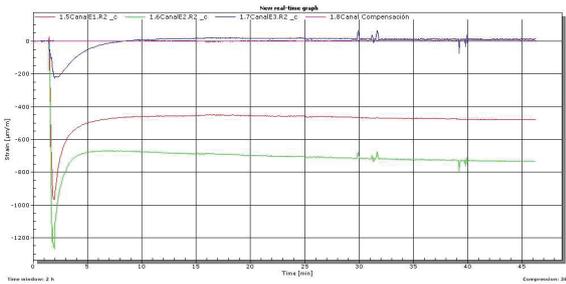
P01



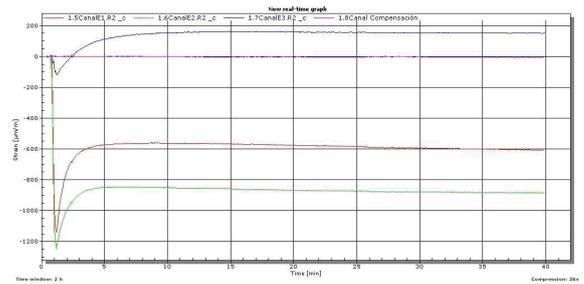
P02



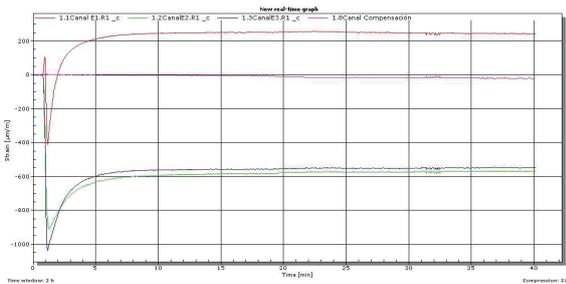
P03



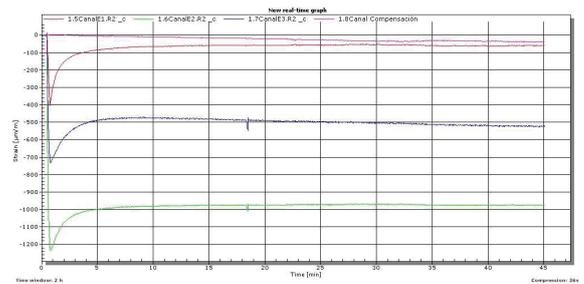
P04



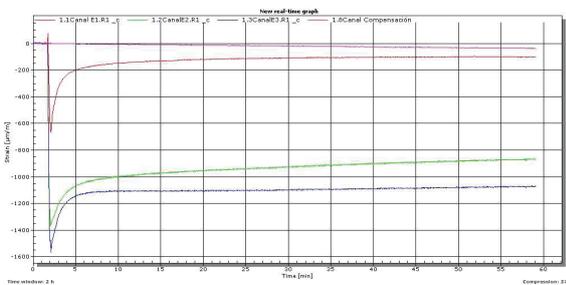
P05



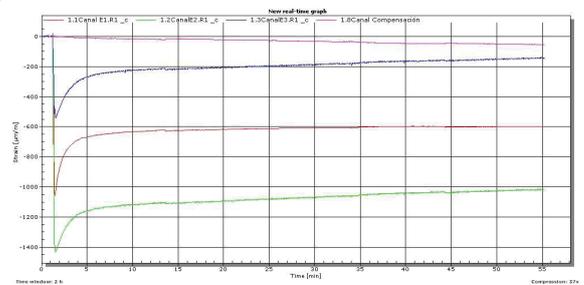
P06



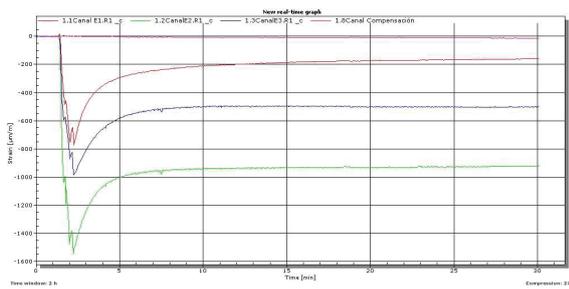
P07



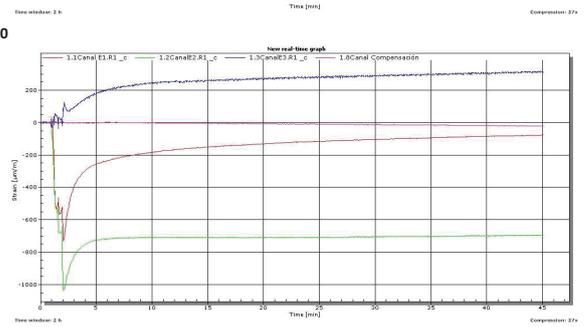
P08



PO9



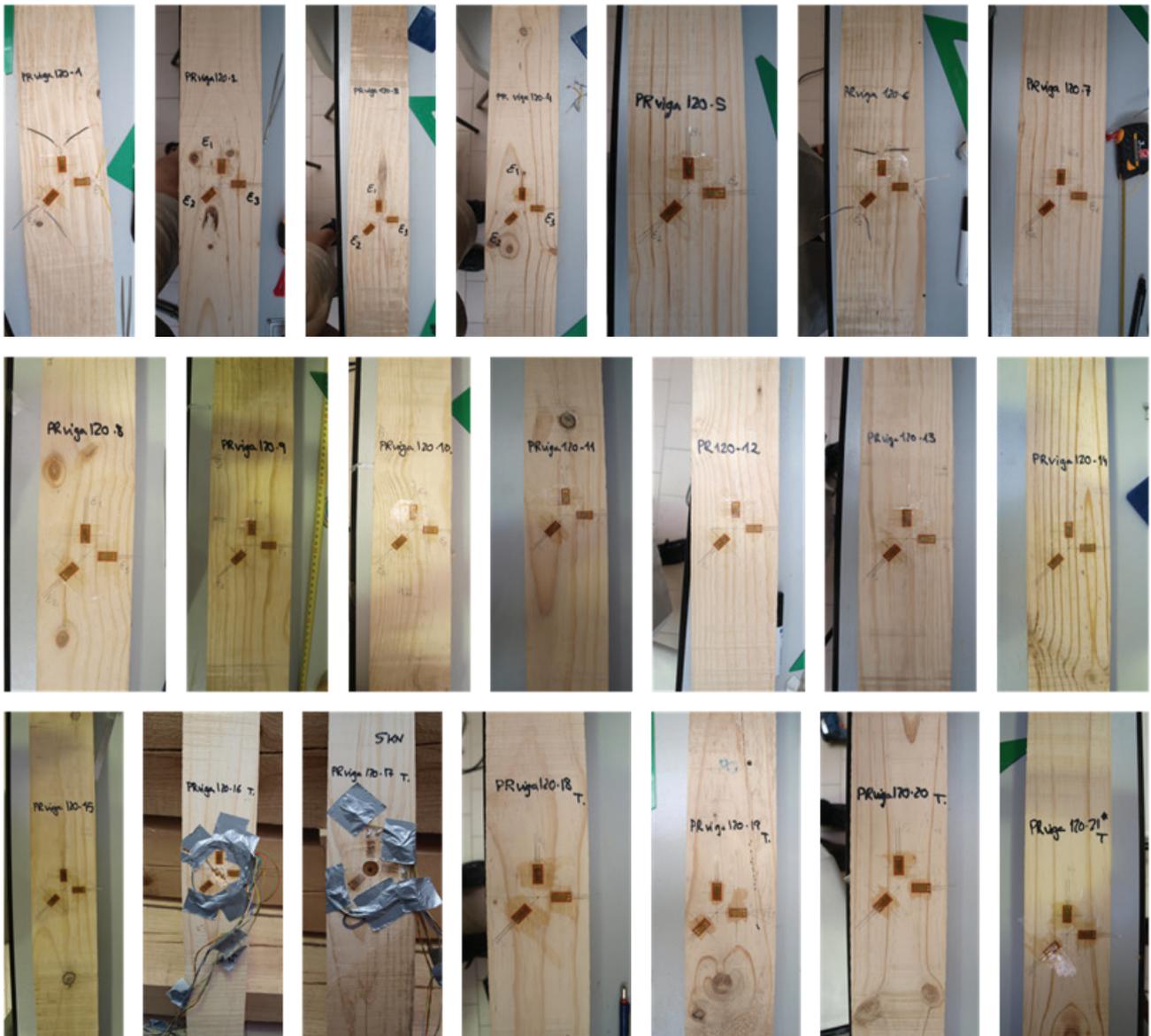
PO10



Deformaciones de Hole Drilling en los ensayos de comprobación a Flexión en las viguetas de 120 cm

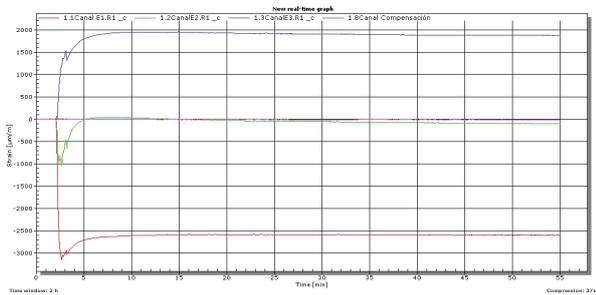
[Tabla]

Viguetas de 120 cm de longitud utilizadas para la comprobación de los datos obtenidos a flexión en el laboratorio de Palencia

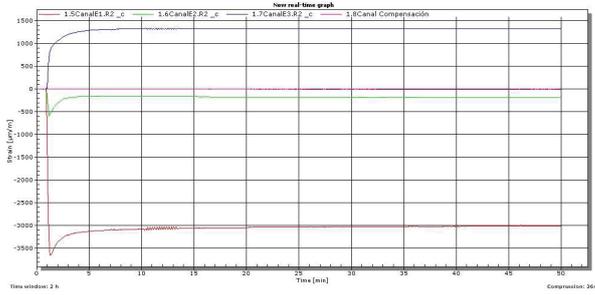


Deformaciones de Hole Drilling en los ensayos de comprobación a Flexión en las viguetas de 120 cm [Gráficos]

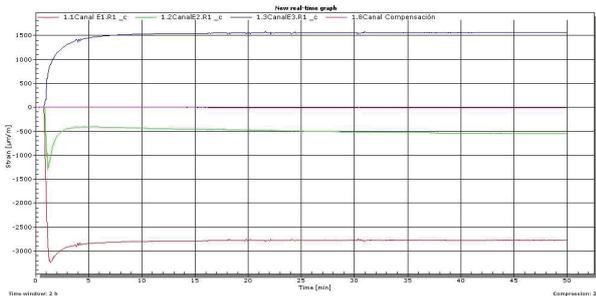
V120-1



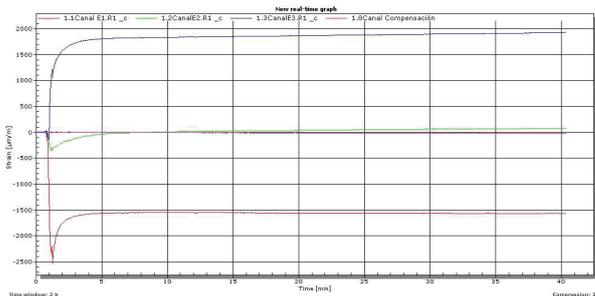
V120-2



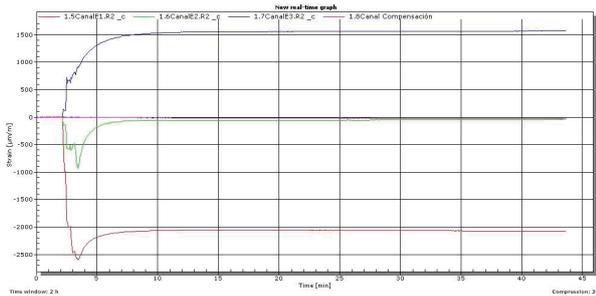
V120-3



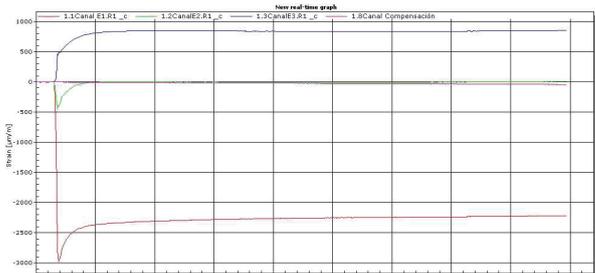
V120-5



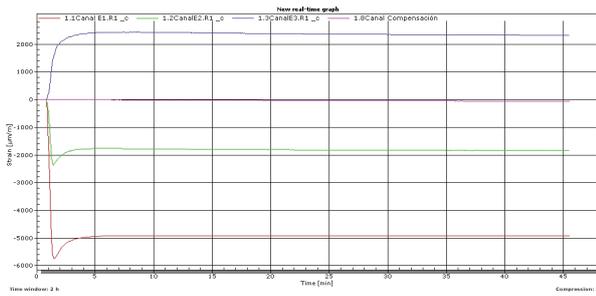
V120-6



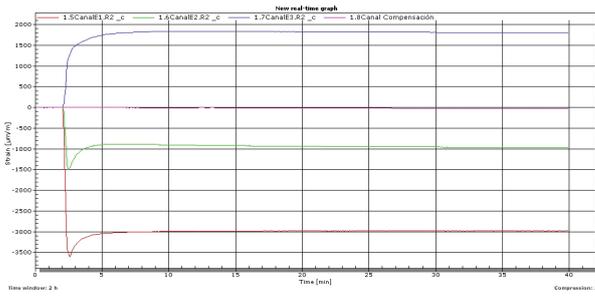
V120-7



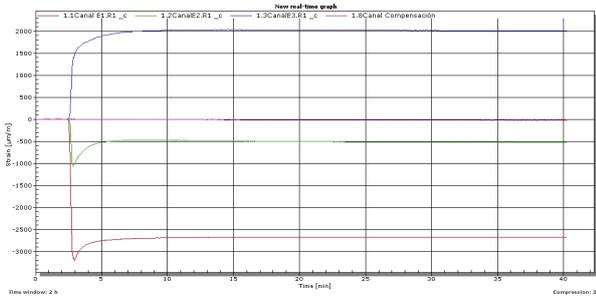
V120-8



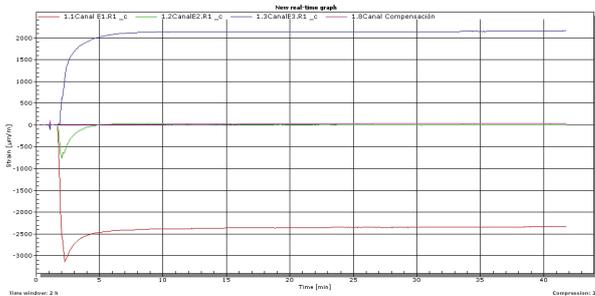
V120-9



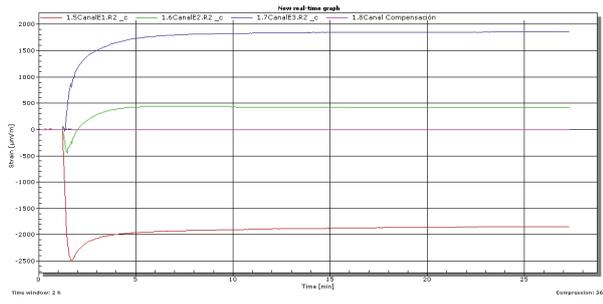
V120-10



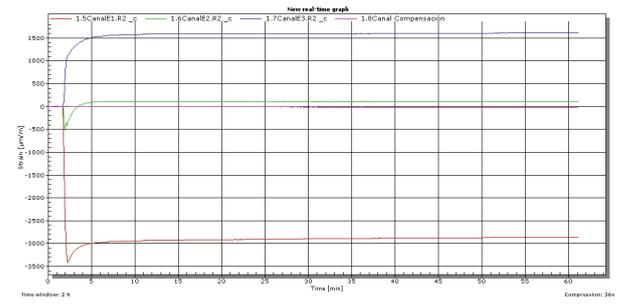
V120-11



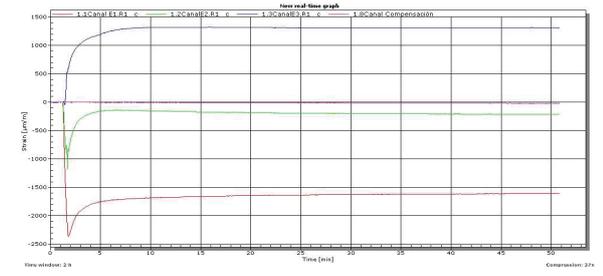
V120-12



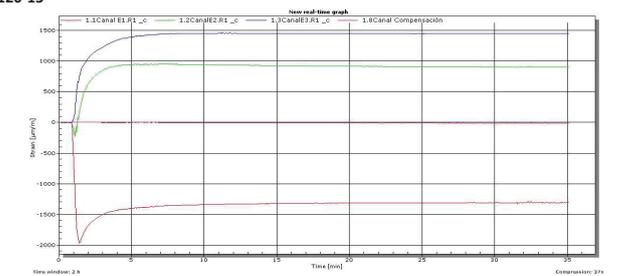
V120-13



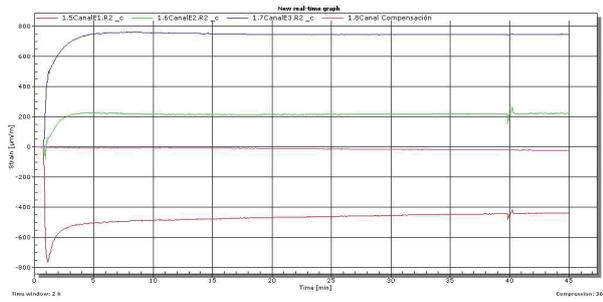
V120-14



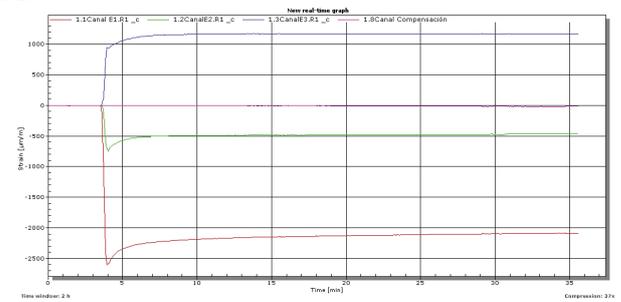
V120-15



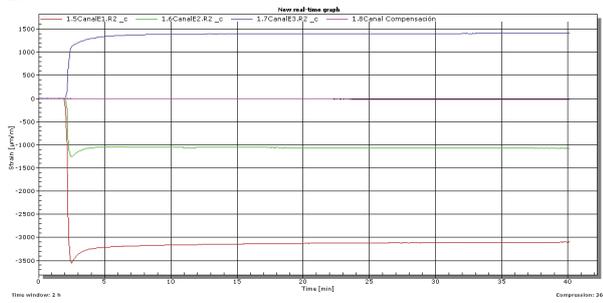
V120-17



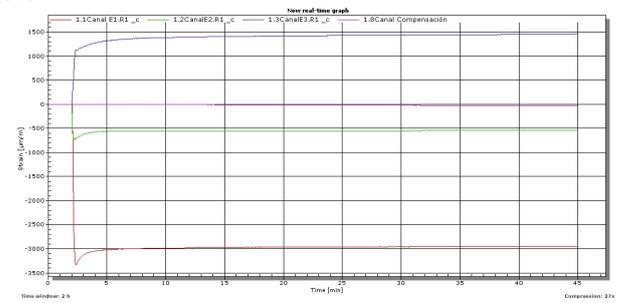
V120-18



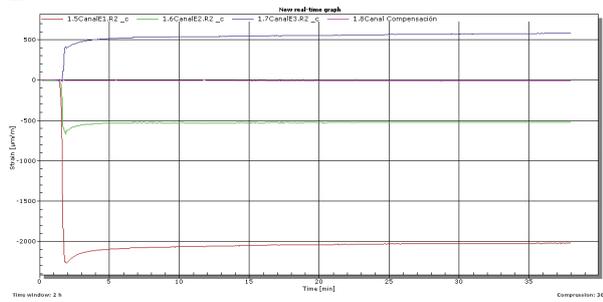
V120-19



V120-20



V120-21



La técnica Hole Drilling puede suponer un pilar fundamental en la inspección estructural de elementos portantes de madera en los edificios existentes. Hole Drilling es una técnica de relajación de tensiones residuales, conocida por su aplicación en otros materiales tecnológicos. Esta Tesis Doctoral afirma que la técnica es apta y útil para medir tensiones de origen estructural en elementos portantes de madera. Se ha ensayado en madera de pino radiata procedente de la CAPV pero es extensible a otras especies, como el roble.

La técnica de aplicación in situ es capaz de determinar el estado tensional real y actualizado de un determinado elemento estructural de madera. La nueva aplicación de la técnica puede ayudar a los técnicos competentes en la inspección y la toma de decisiones en los proyectos de restauración o rehabilitación estructural. Esta técnica ayuda a fomentar la conservación de elementos estructurales de madera, que de otra manera serían sustituidos por otros. En esta Tesis Doctoral se han realizado ensayos de laboratorio en piezas estructurales tanto a compresión como a flexión y se ha aplicado, finalmente, en estructuras reales de edificios existentes, dando lugar a resultados muy satisfactorios.