

UNIVERSIDAD DE GRANADA

**Análisis del estado estructural mediante el método  
de ultrasonidos de una edificación con vigas de  
madera de chopo de 100 años de antigüedad.**

---

**MÁSTER EN REHABILITACIÓN  
ARQUITECTÓNICA**

**FRANCISCO JOSÉ ESPIGARES MARTÍN**

**TUTORES: DR. Francisco José Rescalvo Fernández**

**Miguel Azcona Domínguez**

**SEPTIEMBRE 2020**

## **RESUMEN**

En la actualidad existe gran interés por la conservación del patrimonio histórico y cultural. Para garantizar su seguridad, se necesitan aplicar estudios y ensayos que garanticen la calidad y estabilidad de la edificación. En ocasiones, por sus características la sustitución de un forjado indistintamente de su grado de protección, resulta inviable o muy costoso. Es por ello que surge la necesidad de investigar en el marco de la rehabilitación sobre técnicas que no dañan la estructura, como son los métodos no destructivos.

En este sentido, este Proyecto pretende evaluar los forjados de una vivienda con más de 100 años de antigüedad formados por rollizos de madera chopo mediante el método no destructivo de ultrasonidos.

Además, en muchos de estos edificios toda o parte de su estructura está formada por madera de chopo. Esta madera actualmente no se utiliza con fines estructurales.

## **ABSTRACT**

At present there is great interest in the conservation of historical and cultural heritage. To guarantee its safety, studies and tests are needed to guarantee the quality and stability of the building. Sometimes, due to its characteristics, the replacement of a slab, regardless of its degree of protection, is unfeasible or very expensive. That is why the need arises to investigate in the framework of rehabilitation on techniques that do not damage the structure, such as non-destructive methods.

In this sense, this Project aims to evaluate the floors of a house with more than 100 years old formed by logs of poplar wood using the non-destructive method of ultrasound.

In addition, in many of these buildings all or part of its structure is made up of poplar wood. This wood is currently not used for structural purposes.

Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.

## **AGRADACIMIENTOS**

En primer lugar quisiera agradecer a Paco la oportunidad que me ha dado de realizar este trabajo en su casa, aun sabiendo que nos disponíamos a analizar elementos tan importantes como los forjados de la vivienda y con personas que ni conocía.

No hay palabras suficientes para agradecer a Francisco José Rescalvo Fernández todo el esfuerzo y dedicación que ha puesto en este trabajo, enseñándome todo lo que ha podido y soportándome durante todo lo que ha durado la realización del trabajo. Gracias.

Destacar el gran trabajo que ha realizado y de manera desinteresada Alfonso Segura Maroto, su ayuda ha sido fundamental.

Agradecer a Antolino Gallego Molina esta oportunidad de desarrollo tanto académico como personal.

Agradecer a Miguel Azcona Domínguez todo lo que me ha podido enseñar tanto como tutor del trabajo como profesor del Máster.

Por último, agradecer a toda mi familia y en especial a mis padres, por todo su compromiso y esfuerzo en darme una buena formación académica, sin ellos no hubiese sido posible.

Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.

## LISTA DE SIGLAS Y ABREVIACIONES

CH	Contenido de humedad
END	Ensayos No Destructivos
LVL	Vigas de madera microlaminada
OSB	Tableros de fibras orientadas
MoE	Modulus of elasticity. Módulo de elasticidad
MoE*	Módulo de elasticidad con corrección de humedad
$V_{pp,Em}$	Voltaje de pico del sensor emisor
$V_{pp,Re}$	Voltaje de pico del sensor receptor
$D_{sensores}$	Distancia entre sensores

Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	1
AGRADACIMIENTOS .....	3 <sup>o</sup>
LISTA DE SIGLAS Y ABREVIACIONES .....	5
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1. OBJETIVOS .....	13
1.2. MOTIVACIÓN Y CONTEXTO .....	13
1.3. METODOLOGÍA .....	14
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	15
2.1. MADERA .....	15
2.1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA .....	17
2.1.2. DEFECTOS EN LA MADERA .....	19
2.1.3. NORMATIVA .....	21
2.2. CHOPO.....	23
2.3. MADERA ANTIGUA Y PATRIMONIAL.....	24
2.4. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA MADERA .....	29
2.4.1. CONCEPTOS SOBRE EL MÉTODO DE ULTRASONIDOS .....	33
2.5. ANTECEDENTES.....	35
CAPÍTULO 3. MÉTODOS.....	39
3.1. ESTUDIO PREVIO .....	40
3.2. DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN .....	41
3.3. EQUIPOS DE MEDIDA .....	47
3.4. MEDIDAS EN LOS FORJADOS .....	49
3.5. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	51
3.6. PROCESO DE MEDIDA .....	52
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	55
4.1. ANÁLISIS DEL TECHO DE LA PLANTA 0 .....	55
4.1.1. MEDIDAS LONGITUDINALES.....	55
4.1.2. MEDIDA DE DENSIDAD.....	56
4.1.3. MEDIDA DE MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	58
4.1.4. MEDIDAS TRANSVERSALES .....	61
4.2. ANÁLISIS DEL TECHO DE LA PLANTA 1 .....	63



4.2.1.	MEDIDAS TRANSVERSALES.....	65
4.3.	ASIGNACIÓN DE CLASE RESISTENTE .....	65
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....		67
5.1.	CONCLUSIONES PARTICULARES.....	67
5.1.1.	INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA SOBRE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN.....	67
5.1.2.	INFLUENCIA DE LOS DEFECTOS EN LA MADERA SOBRE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN.....	67
5.1.3.	INFLUENCIA DE LOS DEFECTOS EN LA MADERA SOBRE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN.....	67
5.1.4.	METODOLOGÍA DE APLICACIÓN EN OBRAS DE REHABILITACIÓN CON FORJADOS DE MADERA.....	68
5.2.	CONCLUSIONES GENERALES.....	69
CAPÍTULO 5. BIBLIOGRAFÍA.....		71
ANEXOS. HOJAS DE CAMPO .....		73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes que conforman el tronco de un árbol. Fuente: (Jiménez, 2016) .....	16
Figura 2. Direcciones de las tres secciones principales en la madera. Fuente: <a href="http://protecciondelamadera.com/">http://protecciondelamadera.com/</a> .....	17
Figura 3. Variación de la resistencia de varias propiedades de la madera en relación con la dirección de las fibras. Fuente: (Jiménez, 2016).....	17
Figura 4. Relación entre contenido de humedad y la resistencia a flexión en la madera. Fuente: (Rodríguez, 2019) .....	18
Figura 5. Acebolladura en madera. Fuente: <a href="https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/">https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/</a> .....	19
Figura 6. Nudo en madera. Fuente: <a href="https://normadera.tknika.eu/">https://normadera.tknika.eu/</a> .....	20
Figura 7. Fendas en madera. Fuente: <a href="https://sanite.es/">https://sanite.es/</a> .....	20
Figura 8. Desviación de la fibra en madera. Fuente: <a href="https://normadera.tknika.eu/">https://normadera.tknika.eu/</a>	21
Figura 9. Gemas en madera. Fuente: (Rodríguez, 2019).....	21
Figura 10. Plantaciones de chopo en Soria, España. Fuente: <a href="http://compop.ugr.es/">http://compop.ugr.es/</a>	23
Figura 11. Hongos cromógenos. Fuente: <a href="http://blog.simbolocalidad.com/">http://blog.simbolocalidad.com/</a> .....	25
Figura 12. Pudrición parda en vigas de madera. Fuente: (AITIM, 1992).....	25
Figura 13. Madera afectada por carcoma. Fuente: <a href="https://lamadera.net/">https://lamadera.net/</a> .....	26
Figura 14. Madera estructural afectada por termitas. Fuente: (Azcona, 2018).....	26
Figura 15. Pérdida se sección por la acción de fuego. Fuente: (Azcona, 2018) .....	28
Figura 16. Esquemas de esfuerzos para ensayos destructivos. Fuente: (González, 2012) 30	
Figura 17. Rangos de frecuencia. Fuente: <a href="https://programarfacil.com/">https://programarfacil.com/</a> .....	31
Figura 18. Amortiguación de una onda. Fuente: <a href="https://pc-solucion.es/">https://pc-solucion.es/</a> .....	33
Figura 19. Frentes de onda. Fuente: <a href="https://www.researchgate.net/">https://www.researchgate.net/</a> .....	34
Figura 20. Periodo y amplitud de una onda. Fuente: (Ardizzi, 2011) .....	34
Figura 21. Ejemplo de ondas a menor y mayor frecuencia. Fuente: (Ricagno, 2018)	35
Figura 22. Longitud de onda. Fuente: <a href="https://www.mundomicroscopio.com/longitud-de-onda/">https://www.mundomicroscopio.com/longitud-de-onda/</a> .....	35
Figura 23. Imagen aérea de Pinos Puente. Fuente: Google Maps.....	41
Figura 24. Plano catastral señalizando el contorno de la vivienda.....	41
Figura 25. Izq.: Esquema de sección. Der.: Techo de PL0.....	42
Figura 26. Izq.: Esquema de sección. Centro: Techo de PL1. Izq.: Cubierta. ....	42

Figura 27. Izq.: Forjados inspeccionados en PL0. Der.: Forjados inspeccionados en PL1. 43	
Figura 28. Vista del forjado PL0-HB1. ....	44
Figura 29. Vista del forjado PL0-HB5. ....	45
Figura 30. Presencia de humedad, fendas y carcoma en la viga VP2, PL0-HB5. ....	45
Figura 31. Vista del forjado PL1-HB1. ....	46
Figura 32. Esquema de PL1. ....	46
Figura 33. Osciloscopio PicoScope 4424. ....	47
Figura 34. Sensor Fakopp SD-02. ....	48
Figura 35. Medidor de humedad Surveymaster SM PROTIMETER. ....	48
Figura 36. Barrena Trepbor 35 de 4mm para extracción de microcores. ....	49
Figura 37. Medida longitudinal en rollizos de madera. Medidas en metros. ....	50
Figura 38. Medida transversal en rollizos de madera. Medidas en metros. ....	51
Figura 39. Proceso de medida. ....	53
Figura 40. Velocidad longitudinal. Izq.: HB1. Der.: HB3. Centro: HB5. Línea roja: valor medio de vigas interiores. ....	56
Figura 41. Densidad. Izq.: HB1. Der.: HB3. Centro: HB5. Línea roja: valor medio de vigas interiores. ....	57
Figura 42. MoE*. Izq.: HB1. Der.: HB3. Centro: HB5. Línea roja: valor medio de vigas interiores. ....	59
Figura 43. Medida de MoE en PL0. ....	59
Figura 44. Medida de MoE* en PL0. ....	59
Figura 45. Velocidad transversal. Izq.: HB1. Der.: HB3. Centro: HB5. Línea roja: valor medio de vigas interiores. ....	62
Figura 46. Ratio $V_{pp,em}/V_{pp,re} * D$ sensores. Izq.: HB1. Der.: HB3. Centro: HB5. Línea roja: valor medio de vigas interiores. ....	62
Figura 47. Izq.: Velocidad longitudinal. Der.: Densidad. Centro: MoE*. Línea roja: valor medio de vigas interiores. ....	64
Figura 48. Arriba: Velocidad transversal. Abajo: Ratio $V_{pp,em}/V_{pp,re} * D$ sensores. Línea roja: valor medio de vigas interiores. ....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación visual según UNE-EN 56.544:2011. ....	22
Tabla 2. Clases resistentes para valores de rigidez según UNE-EN 308:2016.....	23
Tabla 3. Resumen de las estancias de la vivienda. ....	43
Tabla 4. Resultado de PLO-HB1.....	60
Tabla 5. Resultados de PLO-HB3. ....	60
Tabla 6. Resultados de PLO-HB5. ....	60
Tabla 7. Resultados de PL1-HB1 .....	64
Tabla 8. Resultados de PL1-HB2 .....	64
Tabla 9. Determinación de la clase resistente de las vigas inspeccionadas. ....	66

Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. OBJETIVOS**

El presente trabajo tiene como objetivo principal conocer la técnica de ultrasonidos en edificaciones antiguas construidas con chopo como material estructural, de manera que se conozcan todos aquellos factores que puede afectar a sus propiedades físico-mecánicas.

Los objetivos específicos del trabajo se exponen a continuación:

- Acometer una metodología de ensayos, destacando la propagación de las ondas ultrasónicas en la madera, para realizar la inspección de elementos estructurales como vigas de madera.
- Conocer la incidencia del contenido de humedad en la propagación de ondas en la madera.
- Conocer la incidencia del deterioro en la propagación de ondas en la madera.
- Conocer la incidencia de los defectos en la propagación de ondas en la madera.
- Obtener el módulo de elasticidad de los elementos inspeccionados.

### **1.2. MOTIVACIÓN Y CONTEXTO**

En la actualidad, en construcción y más concretamente en edificación, cuando se pretende realizar un proyecto, ya sea de obra nueva, rehabilitación, reparación o restauración, se necesita tanto en la fase de proyecto como en la fase de ejecución de obras el máximo conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de los materiales involucrados.

Se ha llevado a cabo un importante desarrollo tecnológico con el fin de obtener las propiedades físico-químicas de los materiales. Esto nos permite conocer cada día con más exactitud las características y propiedades del material en cuestión. Pese a que la madera es un material utilizado históricamente, las normativas y estudios actuales se han centrado más en materiales como hormigón y acero para uso estructural.

### **1.3. METODOLOGÍA**

El proyecto se estructura en dos bloques temáticos. Por un lado, se estudia la madera, el chopo y los métodos no destructivos de evaluación de la madera, concretamente el método de ultrasonidos, y por otro lado, se analizan los resultados que se han obtenido tras realizar un estudio de los forjados de madera de una vivienda particular.

La primera parte, si se obvia este capítulo de introducción (Capítulo 1), se centra en el estado del arte sobre la situación actual del chopo y uso como material estructural en viviendas antiguas y patrimoniales (Capítulo 2). También se detallan los métodos de evaluación destructiva y no destructiva, con especial relevancia del método de ultrasonidos en el Apartado 2.4. Y por último, los antecedentes de dicho método en el Apartado 2.5.

La descripción de la metodología de ensayos así como la de los instrumentos utilizados se detalla en el Capítulo 3. Los resultados que se han obtenido tras realizar el estudio, así como su análisis son descritos en el Capítulo 4.

Por último, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones finales obtenidas a partir de los ensayos realizados.

## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

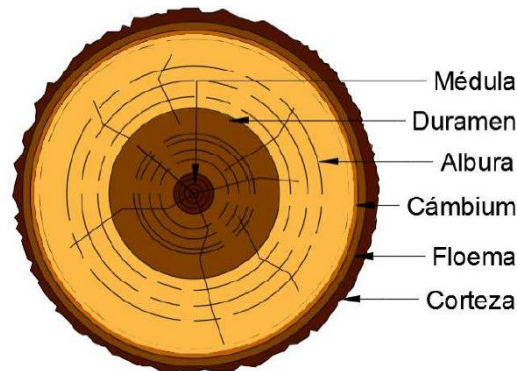
### 2.1. MADERA

La madera, material comúnmente usado a lo largo de la historia en construcción, es un recurso natural con un buen comportamiento mecánico debido a su estructura interna, la cual está básicamente formada por fibras longitudinales de celulosa y una matriz que las mantiene cohesionadas. Las características microscópicas de la madera forman la parte maderable de un árbol y cumple tres funciones: conducción del agua, almacenamiento de sustancias de reservas y resistencia mecánica. Para cumplir estas funciones se distingue en la madera tres tipos de tejidos: conducción (tejido vascular), almacenamiento (tejido parenquimático) y resistencia (tejido fibroso). La estructura, el tamaño y la forma de los tejidos son diferentes en casi todas las especies maderables, es decir, cada especie tiene un sello de estructura propia y característico (Arostegui, 1982). Las frondosas tienen una estructura más complicada que las coníferas, pues existe una mayor especialización de las células de fibra. Otra diferencia notable de las frondosas es el tamaño de las células que raramente llegan a 2 mm. Los vasos constituyen entre el 5% y el 60% del volumen de la madera y están formados por células sin contenidos protoplasmáticos, dispuestas axialmente, cuya característica principal es que las paredes transversales están disueltas total o parcialmente de forma que existe una comunicación perfecta de célula y la siguiente. Por otra parte, la comunicación transversal se realiza a través de punteaduras areoladas (si se comunican con fibras o traqueidas) o simples (si se comunica con parénquima), cuyo tamaño es sensiblemente inferior al de las coníferas, siendo raro que superan los 6  $\mu\text{m}$  (Vignote y Martínez, 2006).

La madera se ha usado y se usa como material estructural en numerosas estructuras como forjados y cerchas. En las últimas décadas, han prevalecido materiales como el hormigón y el acero para la realización de estructuras pero cada vez más existe una tendencia que va creciendo del lado de la madera por ser un material que apuesta más por la sostenibilidad y por una economía circular. Cabe destacar que las propiedades físico-mecánicas dependen altamente del lugar de



extracción y de la especie arbórea. En la Figura 1, se diferencian las partes del tronco de un árbol definidas a continuación.

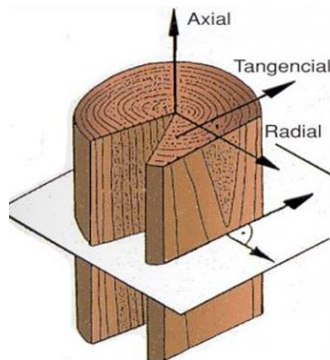


**Figura 1.** Partes que conforman el tronco de un árbol. Fuente: (Jiménez, 2016)

- Médula: Zona oscura de células vivas esponjosas en el centro del tronco del árbol.
- Duramen: Albura muerta que rodea la médula, con vasos llenos de lignina y celulosa. Es la madera más dura del árbol.
- Albura: El nombre científico para albura es xilema. Esta capa la forman células vivas con vasos conductores de savia en funcionamiento. Es la madera más joven del árbol. Con los años, las capas internas de albura mueren y se convierten en duramen.
- Corteza: Es la capa exterior del tronco y ramas. Su función es la de proteger al árbol.
- Floema o líber: Tejido conductor que permite el transporte de la savia elaborada y de las sustancias orgánicas. Está asociado con el xilema.
- Cámbium: La capa delgada de células vivas dentro de la corteza se llama cámbium. Es la parte del árbol que crea madera nueva hacia adentro, y corteza hacia afuera.

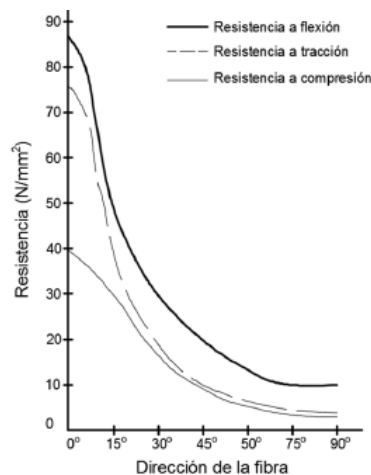
### 2.1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA

La madera, material heterogéneo y anisótropo, presenta propiedades tanto físicas como mecánicas diferentes en todas sus direcciones. Se considera un material ortótropo en tres direcciones (Figura 2). La dirección axial es aquella paralela a la fibras de la madera, la dirección radial es paralela a los radios o perpendicular a los anillos de crecimiento y, por último, la dirección tangencial es perpendicular a los radios o tangencial a los anillos de crecimiento.



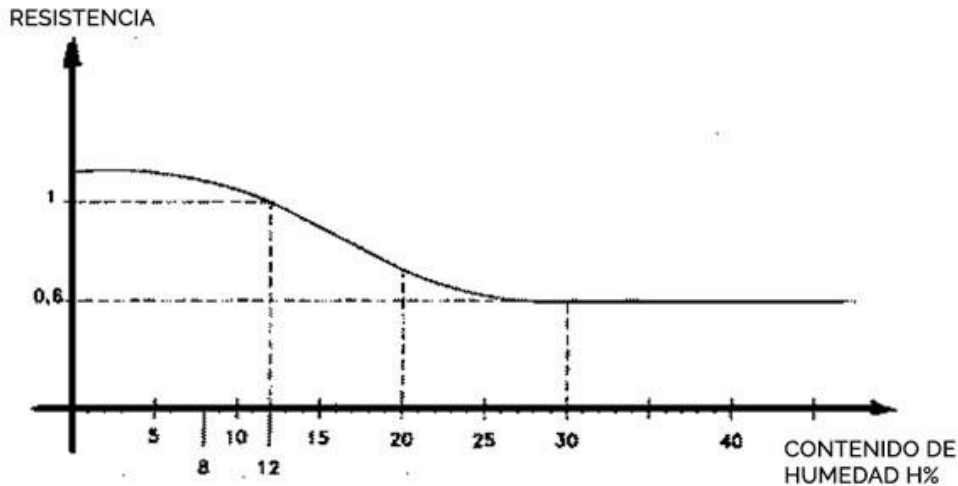
**Figura 2.** Direcciones de las tres secciones principales en la madera. Fuente: <http://protecciondelamadera.com/>

La dirección de la fuerza que se aplica a la madera está altamente influenciada por la dirección de la fibra. Esto produce que el material tenga características resistentes muy diferentes (Figura 3). La resistencia a tracción radial, es entre 30 y 70 veces menor que la resistencia a tracción axial, mientras que la resistencia a compresión es del orden de 4 veces mayor en la dirección axial que en la dirección radial.



**Figura 3.** Variación de la resistencia de varias propiedades de la madera en relación con la dirección de las fibras. Fuente: (Jiménez, 2016)

La madera también es un material higroscópico, es decir, el contenido de humedad (relación existente entre el peso del agua y el de la madera) de la pieza afecta directamente a las propiedades mecánicas de la misma.



**Figura 4.** Relación entre contenido de humedad y la resistencia a flexión en la madera. Fuente: (Rodríguez, 2019)

Tal y como se observa en la Figura 4, se produce un descenso de la resistencia conforme aumenta el contenido de humedad (CH) en la madera. Se observa que la resistencia una vez que se supera el 25% de CH apenas varía.

La densidad en la madera, como en cualquier material viene determinada por dos factores, la cantidad de masa relacionada con un volumen definido. Es esencial conocer la densidad que contiene un material como la madera para realizar el diagnóstico de la pieza. La densidad de la madera es variable ya que depende de distintos factores tan importantes como la especie, la concentración en agua y el estado de conservación en el que se encuentra.

Las características mecánicas de la madera se resumen en:

- Resistencia a compresión.

La madera tiene alta resistencia a compresión. Para la madera de tipo estructural, los valores característicos oscilan entre los 16 y 23 N/mm<sup>2</sup> (Argüelles *et al.*, 1996). Por ello, a lo largo de la historia, los pilares y pares de cubierta de las edificaciones eran de madera.

- Resistencia a tracción.

En la madera de tipo estructural los valores característicos varían entre 8 y 18 N/mm<sup>2</sup> (Argüelles *et al.*, 1996). En edificaciones, se encuentran tirantes y pendolones de madera que trabajan a tracción.

- Resistencia a flexión.

La madera también tiene resistencia a flexión muy elevada. En madera de uso estructural los valores característicos varían entre 14 y 30 N/mm<sup>2</sup> (Argüelles *et al.*, 1996). Los elementos estructurales que se encuentran en edificaciones son las vigas y las viguetas.

- Resistencia a cortante.

Los valores característicos de esfuerzo a cortante en madera varían entre 3 y 4 N/mm<sup>2</sup> (Argüelles *et al.*, 1996). Las tensiones tangenciales que origina dicho esfuerzo pueden ser de deslizamiento, cortadura o rodadura. Este fallo se debe tener muy en cuenta cuando se habla de estructura de madera, puesto que la misma puede colapsar de manera violenta.

### 2.1.2. DEFECTOS EN LA MADERA

Se define defectos de la madera como imperfecciones ocasionados en ella, denominados gemas, fendas, acebolladuras y nudos, todos ellos regulados en la norma UNE 56.544:2011.

- Acebolladuras.

Huecos producidos por la separación de los tejidos leñosos, los cuales se manifiestan por las heladas.



**Figura 5.** Acebolladura en madera. Fuente: <https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/>

- **Nudos.**

Provocados por el nacimiento de una rama. Afectan gravemente a la resistencia, especialmente a tracción. Hay que distinguir entre nudos vivos y muertos.



**Figura 6.** Nudo en madera. Fuente: <https://normadera.tknika.eus/>

- **Fendas.**

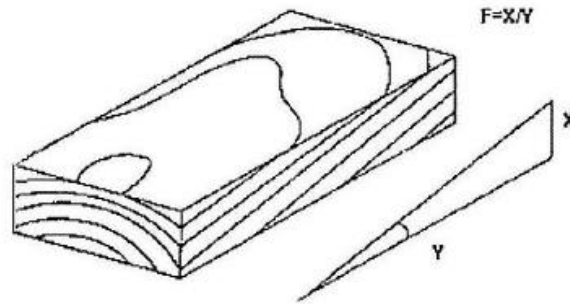
Son grietas en el sentido de la fibra, transversales a los anillos de crecimiento, provocadas por la contracción durante el secado. Una misma madera sufrirá fendas más abiertas cuanto mayor sea el tamaño de la pieza, para una misma pérdida de agua.



**Figura 7.** Fendas en madera. Fuente: <https://sanite.es/>

- **Desviación de la fibra.**

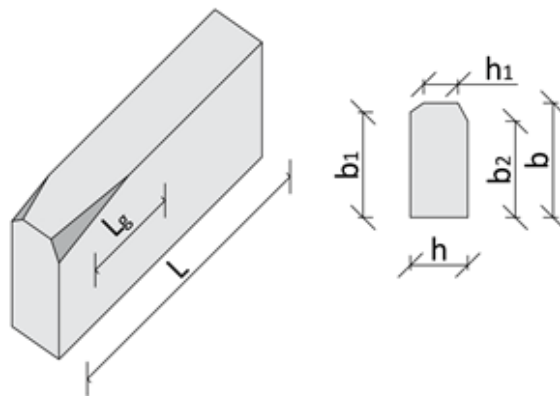
No hay coincidencia entre la dirección de la fibra y el eje longitudinal de la pieza. Puede ser general, es decir, afecta a toda la pieza, o local si la desviación únicamente afecta a un sector reducido.



**Figura 8.** Desviación de la fibra en madera. Fuente: <https://normadera.tknika.eu/>

- Gema.

Se deben a un defecto en el aserrado. Es una superficie redondeada original de un tronco que aparece en una arista. Se evalúa en función de su largo respecto al largo de la pieza, o respecto de las dimensiones de la sección de máxima pérdida respecto de la sección de la pieza.



**Figura 9.** Gemas en madera. Fuente: (Rodríguez, 2019)

### 2.1.3. NORMATIVA

En los ensayos que se han realizado, se puede observar como los defectos de la madera afectan directamente a la velocidad de transmisión y a la propagación de ultrasonidos.

La UNE-EN 56.544:2011 Clasificación visual de la madera para uso estructural, aunque no incluye el chopo, sirve de ejemplo para clasificar la dimensión de los defectos que contiene la madera estructural.

La UNE-EN 338:2016 establece un sistema de clases resistentes de uso general en el marco de las normas de cálculo estructural, donde se aporta los valores característicos

de las propiedades de resistencia, rigidez y los valores de densidad para cada clase citada en la Norma EN 14.081-1

CRITERIOS		ME-1	ME-2
Diámetro de los nudos sobre la cara (h)		$d \leq 1/5$ de "h"	$d \leq 1/2$ de "h"
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)		$d \leq 1/2$ de "b" y $d \leq 30$ mm	$d \leq 2/3$ de "b"
Fendas	De secado <sup>(2)(3)</sup>	$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
		Las fendas de secado sólo se consideran si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza y 1 m.	
	- Rayo - Heladura - Abatimiento	No permitidas	
Acebolladuras		No permitidas	
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 %)
Gemmas			
- Longitud		$L_g \leq 1/4$ de "L"	$L_g \leq 1/3$ de "L"
- Dimensión relativa		$g \leq 1/4$	$g \leq 1/3$
Alteraciones biológicas			
- muérdago		No se admite	
- azulado		Se admite	
- pudrición		No admite	
- insectos xilófagos		No admite	
Deformación máxima <sup>(2)(3)(4)</sup>			
- Curvatura de la cara		10 mm (longitud de 2m)	20 mm (longitud de 2m)
- Curvatura del canto		8 mm (longitud de 2 m)	12 mm (longitud de 2 m)
- Alabeo		1 mm (por cada 25 mm de "h")	2mm (por cada 25mm de h)
- Abarquillado		Sin limitación	Sin limitación
(2) No se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.			
(3) Referidas a un 20% de contenido de humedad.			
(4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción.			

**Tabla 1.** Clasificación visual según UNE-EN 56.544:2011.

	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27
Propiedades de rigidez en Kn/mm <sup>2</sup>							
Módulo de elasticidad medio en flexión paralela a la fibra	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5

**Tabla 2.** Clases resistentes para valores de rigidez según UNE-EN 308:2016.

## 2.2. CHOPO

El chopo, perteneciente a la familia *Populus*, se extiende por todo el mundo gracias a su rápido crecimiento y adaptabilidad a climas y suelos. En España, las plantaciones de chopo se concentran principalmente en la ribera del Ebro (25%), la ribera del Duero (50%), en Cataluña (5%) y Granada (3,5%).



**Figura 10.** Plantaciones de chopo en Soria, España. Fuente: <http://compop.ugr.es/>

El chopo utilizado como material estructural siempre ha estado limitado por la ausencia de bosques puros donde los chopos pudiesen desarrollar las dimensiones que se requieren para una viga, y a pesar de ser un buen material para uso estructural con una baja densidad y alta estabilidad dimensional. Tal y como se ha comentado anteriormente, el chopo está en desuso como material estructural en España, debido a que no existe ninguna norma que regule la clase resistente que lo incluya, pese a que como demuestran edificaciones antiguas es totalmente viable para estructuras de madera. La última versión de norma española que incluye el chopo fue la UNE-EN 56.544:1997 junto a las coníferas por la similitud de sus propiedades. Esto no ocurre en Francia, donde sí que está incluido en sus normas vigentes, concretamente NFB52-001:2001.



Muchos autores tienen como objetivo que se vuelva a incluir el chopo en la norma española de clases resistentes y de este modo poder conseguir que se utilice de manera estructural. En España, país líder en el sector, el chopo producido se utiliza como contrachapado entre el 65% y 70% del total. En los últimos años se han estudiado nuevos productos como vigas de madera microlaminada (LVL), tableros de fibras orientadas (OSB) y vigas laminadas con el fin de revalorizar el sector.

(Casado y colaboradores, 2002) realizaron una clasificación de madera estructural de una plantación de Palencia, del clon I-214. Se realizaron ensayos a flexión de cuatro puntos según UNE-EN 408:2016. El 55,3% de las vigas fueron rechazadas, el 34% fueron clasificadas como C14 y el 7,4% como C18. Se compararon los resultados con la norma francesa NFB52-001:2007, y como conclusión se obtuvo mejores datos puesto que el 70% de las vigas se clasificaron correctamente, el 23% se sobreclasificaron y el 7% se infraclasificaron. Como conclusión se llegó a que el módulo de elasticidad es bastante inferior al de las coníferas, aunque la resistencia sí que era similar, por tanto se propuso la creación de dos clases resistentes exclusivas para el chopo.

### **2.3. MADERA ANTIGUA Y PATRIMONIAL**

La madera antigua y patrimonial está destinada prácticamente en su totalidad a su uso como forjados en edificios. Cuando se pretende realizar un estudio de la edificación, lo primero que se debe hacer es un análisis exhaustivo del estado de dichos forjados, que pueden estar aparentemente en buen estado de conservación o forjados que contengan patología de origen biótico o abiótico ocultas a simple vista.

Tras la inspección visual se puede tener una idea del estado en el que se encuentra la edificación, pero ello debe ser corroborado para certificar el estado real de la estructura, o lo que es lo mismo comprobar si las cabezas de las vigas empotradas y las secciones interiores que no se pueden ver, se encuentra en buen estado de conservación. Un aspecto importante por el cual es necesario realizar ensayos en los elementos estructurales es debido a que la madera puede perder resistencia por su envejecimiento. Además, en las rehabilitaciones es usual proponer cambios de uso, lo

que conlleva a un cambio en la sobrecarga de la edificación y, por tanto, modificaciones en las cargas a soportar por la estructura.

Como se ha comentado anteriormente, la madera antigua presenta patologías de origen biótico o abiótico. Las patologías de origen biótico están causadas por varios tipos de organismos xilófagos (Arriaga *et al.*, 2002). Los organismos xilófagos se alimentan de la madera, y se clasifican en hongos cromógenos (Figura 11) y hongos de pudrición. Los primeros no afectan a la pared celular, con lo cual disminuyen la resistencia mecánica de la madera y plantean principalmente un problema estético (Arriaga *et al.*, 2002).



**Figura 11.** Hongos cromógenos. Fuente: <http://blog.simbolocalidad.com/>

A diferencia de los hongos cromógenos, los de pudrición sí que afectan a las propiedades mecánicas de la madera puesto que se alimentan de los componentes pertenecientes a la pared celular. Existen tres tipos de pudrición (Arriaga *et al.*, 2002): pudrición parda o cúbica (producida por hongos del orden basidiomicetos) como se observa en la Figura 12, pudrición blanca o fibrosa y pudrición blanda.



**Figura 12.** Pudrición parda en vigas de madera. Fuente: (AITIM, 1992)

La pudrición parda es muy destructiva si se mantiene la humedad óptima para el desarrollo del hongo 40%-50%, lo que en pocos años puede provocar la destrucción de la cabeza de una viga. En los edificios de la península ibérica, la madera está expuesta a los ataques de insectos de ciclo larvario (coleópteros) y sociales (isópteros), pertenecientes a las familias de los anóbidos (carcoma fina), cerambícidos (carcoma grande), líctidos (polilla), curculiónidos (gorgojo), bostríchidos, platipódidos (escarabajos de ambrosía), escolítidos (carcoma negra) y termitas (Arriaga et al., 2002).



**Figura 13.** Madera afectada por carcoma. Fuente: <https://lamadera.net/>

Particularmente las termitas subterráneas, son los insectos más peligrosos para estructuras de madera en Europa Mediterránea. Cada año, las termitas subterráneas en Europa causan un gasto superior a 700 millones de euros en daños y reparaciones de estructuras de madera (UNEP, 2000).



**Figura 14.** Madera estructural afectada por termitas. Fuente: (Azcona, 2018)

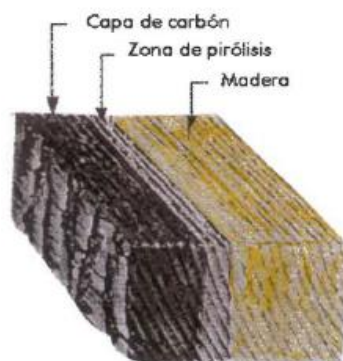
En la actualidad existen sistemas remotos de monitorización de madera patrimonial aunque no pueden evaluar daños ya sufridos por la madera, como es el sistema descrito con la patente US5815090, que recoge datos previamente enviados a un procesador para la detección de plagas. La detección se lleva a cabo cuando la termita muerde el conductor eléctrico. La compañía GE Measurement y Control Solutions, desarrolló un sistema llamado Protimeter HygroTrac, el cual proporciona un sistema de monitorización inteligente que informa sobre el estado de parámetros ambientales como la humedad, la temperatura y el contenido de humedad de la madera. La Universidad Edith Cowan también desarrolló un sistema de sensores inalámbricos acústicos llamado WiSPr, que consiste en un diminuto sensor que va fijado a la madera y detecta la firma acústica de las termitas masticando. En (AIDIMME, 2018) se considera el sistema CADIX el más adecuado para detectar y monitorizar la biodegradación de la madera por los siguientes motivos:

- El sistema es completamente automático e inalámbrico y monitoriza continuamente la humedad interna de la madera y la existencia de movimientos en su interior. Por tanto puede detectar cualquier insecto xilófago (termitas, anóbidos, líctidos, cerambícidos, etc.).
- Puede detectar riesgos para la degradación por hongos porque relaciona las condiciones de la madera (contenido en humedad y temperatura) con las condiciones de pudrición.
- A diferencia de otros sistemas, este no basa la detección de insectos xilófagos en que los insectos tengan que comer en cebos madera o celulosa.
- Ha sido probado durante 6 años con resultados exitosos, tanto en laboratorio como en edificios (el archivo de la catedral de Valencia, por ejemplo).
- Permite la futura integración adicional de otros sensores (por ejemplo fisurómetros o galgas extensiométricas).
- El sensor carece de partes móviles. Es pequeño y compacto, así como sencillo de instalar y mantener.
- La radiación del emisor LED, al estar parcialmente en la zona de infrarrojos, es considerada por las termitas como una fuente de calor, y por lo tanto como un

peligro. Por este motivo, si están presentes en un elemento de madera, las atrae desde cualquier parte del elemento.

Por otro lado, los agentes abióticos son aquellos ataques que puede experimentar la estructura por la acción del fuego o por cambios bruscos de temperatura, lo que fomenta la aparición de fisuras y fendas en la estructura, por tanto es interesante saber cómo afectan las mismas a la resistencia de la pieza, ya que producen una reducción de superficie de la sección y afecta a la resistencia del esfuerzo cortante. Esto significa que hay que tener especial cuidado donde se produzcan las tensiones máximas, como es el caso de las cabezas de las vigas. Por ello, es muy importante detectar y reseñar dónde se encuentran las fendas así como su dimensión y extensión.

Cuando se encuentre una estructura dañada por la acción del fuego, se debe estar pendiente de la reducción de sección que se produce en la pieza debido a la carbonización (Figura 15), que dependerá del tiempo de duración del incendio. Para ello, se podrían realizar medidas transversales para determinar la zona interior de la madera que se encuentra sana.



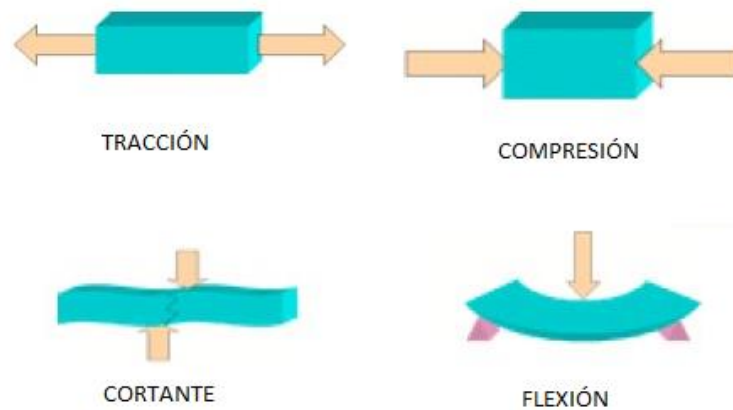
**Figura 15.** Pérdida de sección por la acción de fuego. Fuente: (Azcona, 2018)

## 2.4. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA MADERA

Actualmente, gracias al desarrollo tecnológico en la realización de ensayos, es posible aplicar un mayor número de métodos y técnicas para obtener el máximo conocimiento posible de las características, propiedades de los materiales y su estado de conservación. Los ensayos que se realizan a los materiales para conocer sus propiedades mecánicas y físicas, intentando simular las condiciones a las que van a ser expuestas pueden ser destructivos y no destructivos.

Los ensayos destructivos son aquellos que se caracterizan porque deforman y dañan el material, y por tanto este no puede volver a ser utilizado, razón de peso por la cual no se han realizado en este Proyecto. Además de conllevar al desmontaje parcial del forjado. La norma que regule la gran parte de los ensayos destructivos en madera es la UNE-EN 408. Entre los ensayos destructivos se encuentran los siguientes:

- Ensayo a compresión: Determina la resistencia a la compresión axial, determinando la tensión en el límite de proporcionalidad y tensión máxima.
- Ensayo a cortante: Es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de la pieza estudiada.
- Ensayo a tracción: Consiste en aplicar a una probeta determinada un esfuerzo axial de tracción, hasta que se produzca la rotura de la probeta.
- Ensayo a torsión: Deformación helicoidal que sufre un cuerpo al aplicar un sistema de fuerzas paralelas de igual magnitud y sentido contrario.
- Ensayo a flexión: Determina el módulo de elasticidad a flexión, el esfuerzo y la deformación a flexión de una muestra del material a examinar.
- Ensayo de fatiga: Cuando se someten esfuerzos de magnitud y sentido variables a un material, este se rompe con cargas inferiores a su resistencia a la rotura normal, esto sucede porque el material sufre un desfallecimiento que hace que rompa incluso antes del límite elástico.



**Figura 16.** Esquemas de esfuerzos para ensayos destructivos. Fuente: (González, 2012)

Los ensayos no destructivos (END) son aquellos que no alteran de forma permanente las propiedades mecánicas, físicas, químicas o dimensionales de un material. Estos métodos se basan en la aplicación de fenómenos físicos y se usan para medir, detectar, localizar y evaluar defectos para garantizar un adecuado comportamiento en uso.

El desconocimiento de las propiedades mecánicas de madera antigua y patrimonial limita o prácticamente imposibilita rehabilitar adecuadamente una edificación o estructura de madera de más de 70 años. Según datos de AIDIMME, se calcula que un 70% de la madera antigua/patrimonial que se sustituye en España, principalmente por desconocimiento de su estado o porque superficialmente presenta deterioros, podría bien conservarse o bien rehabilitarse con refuerzos o reparaciones muy localizadas y de poco coste económico.

En (Pellerin y Ross, 2002), se establece que los END adecuados para madera son las resistografías, las vibraciones inducidas y los ultrasonidos.

Para resistografías (taladro mecánico que realiza una perforación en la dirección radial de la sección de la pieza y que evalúa sus resistencia), según (Arriaga *et al.*, 2002), la correlación con la densidad de la madera seca es muy elevada ( $R^2=0,8$ ), para madera actual y sana.

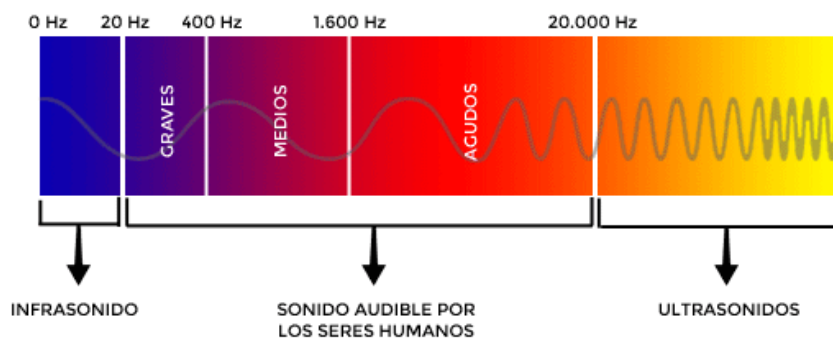


En cuanto a la técnica de vibraciones inducidas, se han realizado estudios para los que el rango de correlación entre el módulo de elasticidad (MoE) medido destructivamente mediante máquina universal de ensayos y medido por estas vibraciones, en frondosas varía desde 0,84 a 0,97 (Chudnoff *et al.*, 1984). Aunque dicha técnica, únicamente puede aplicarse en elementos libres, donde puedan vibrar sin restricciones, lo que imposibilita su utilización en madera ya instalada en edificios antiguos.

Por último, conocer que la correlación existente entre el MoE medido por ultrasonidos y medido destructivamente mediante máquina de ensayos varía entre 0,87 a 0,98 (Pellerin y Ross, 2002) para madera actual y sin defectos relevantes.

En este Proyecto se ha empleado el método de ultrasonidos, el cual, es una técnica que nos permite conocer la velocidad de propagación de una onda ultrasónica, siendo necesario medir anteriormente la distancia recorrida y el tiempo invertido. La propagación de dicha onda depende totalmente de las propiedades del material, así como de su estructura, dicha propagación se realiza en un medio elástico, con lo que se debe de cumplir la ley de Hooke.

En la Figura 17 se presentan de forma esquemática los rangos de frecuencia usuales, en concreto los ultrasonidos no son perceptibles al oído humano y los más comunes se encuentra entre 0,5 mHz y 1000 mHz.



**Figura 17.** Rangos de frecuencia. Fuente: <https://programarfacil.com/>

El proceso que se debe realizar es transformar vibraciones mecánicas en pulsos eléctricos, y para ello se debe utilizar palpadores que reciben y generan señales



ultrasónicas. La conversión de energía se consigue a través de fenómenos físicos como el efecto piezoeléctrico y efecto magnetostrictivo.

En el estudio que se ha realizado, el palpador utilizado es piezoeléctrico. Este consiste en una sonda constituida por cristales piezoeléctricos que tienen la propiedad que al ser sometidos a una diferencia de potencial eléctrico entre sus caras se dilatan y se contraen generando así una onda acústica. Dicha onda, producida por una frecuencia elevada, genera el ultrasonido. Los cristales de dicha sonda son capaces de dilatarse y contraerse cuando se refleja la onda acústica generando así una diferencia de potencial eléctrico entre sus caras, la transformación de energía eléctrica en acústica y acústica en eléctrica en un cristal, se denomina efecto piezoeléctrico. El material utilizado está polarizado, por tanto una parte de las moléculas están cargadas negativamente y otras positivamente. La pieza va conectada a un electrodo en las dos caras opuestas de la pieza, por tanto cuando aplicamos un campo eléctrico en un material sus moléculas polarizadas se alinean formando un dipolo inducido en una estructura cristalina. Normalmente el espesor del cristal que se utiliza viene determinado por la frecuencia del transductor. Los cristales serán más delgados cuando las frecuencias que se requieran sean más altas.

Los motivos por los que se utiliza el método de ultrasonidos son los siguientes:

- Aplicación in-situ

Es una ventaja que destaca sobre el resto de métodos más sofisticados como los rayos x, ya que el instrumental necesario para realizar los ensayos es de pequeño tamaño.

- Método no destructivo

La pieza sometida a ensayo no requiere ser cortada, seccionada o expuesta a agentes químicos nocivos. Esto permite realizar todos los ensayos necesarios para conocer el estado de la edificación objeto de estudio, además de no dañar el material en obras de interés histórico o artístico. Por último, añadir que tampoco existen daños para la salud a diferencia de la radiografía.

- Resultados objetivos

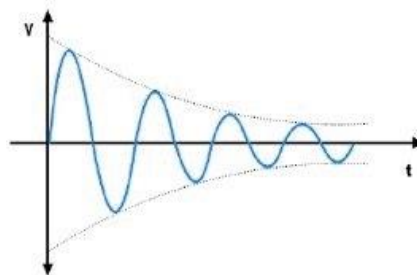
El método de ultrasonidos se basa en la propagación de una onda elástica a través de un cuerpo, mediante el cual se obtiene una lectura del tiempo de transmisión. Esta lectura proporciona una medida objetiva e independiente de quien realice el ensayo, minimizando el error en la toma de medidas.

Del mismo modo, se destaca que el método visual es una herramienta más que constituye los diferentes tipos de técnicas de ensayos en la madera, pero es un método incompleto, ya que no aporta ninguna información del interior de la pieza objeto de estudio, aparte de ser un método más subjetivo.

#### 2.4.1. CONCEPTOS SOBRE EL MÉTODO DE ULTRASONIDOS

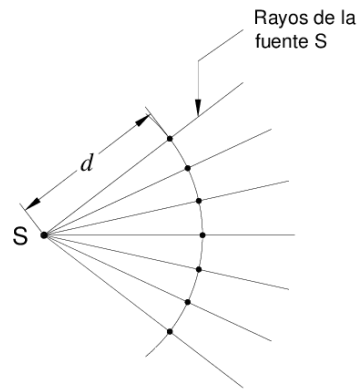
El sonido es producido por la vibración mecánica de partículas que componen el medio, dicha vibración hace que la energía de la onda sea transmitida por el mismo. Los ultrasonidos son aquellos cuya frecuencia está por encima del rango audible. A continuación, se definen los términos básicos de la técnica por ultrasonidos.

- Onda: Fenómeno de propagación de un movimiento oscilatorio provocado por la vibración que producen las moléculas de un material.
- Amortiguación: Disminución de amplitud de la onda.



**Figura 18.** Amortiguación de una onda. Fuente: <https://pc-solucion.es/>

- Velocidad de propagación: Velocidad a la que se propaga el sonido, dicha velocidad depende de las propiedades de cada material.
- Frente de onda: Lugar geométrico que une todos los puntos que se encuentran en un idéntico estado de vibración, o lo que es lo mismo, que tiene igual fase.



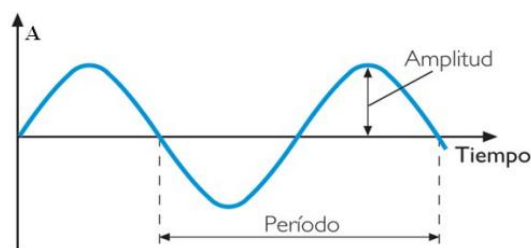
**Figura 19.** Frentes de onda. Fuente: <https://www.researchgate.net/>

Las ondas son caracterizadas por los siguientes componentes:

- **Amplitud:** La amplitud de un movimiento oscilatorio es la medida de la variación máxima del desplazamiento que varía periódicamente en el tiempo, en definitiva es la distancia que encontramos entre el punto de equilibrio y el punto más alejado de la onda.

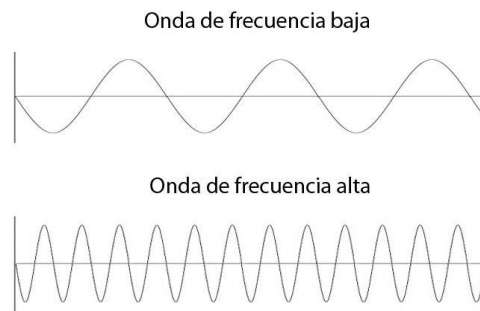
En el caso de una onda registrada por un sensor de ultrasonidos y generada por un impulso, la amplitud máxima es el mayor valor alcanzado por la misma.

- **Periodo:** Es el tiempo que transcurre entre 2 puntos equivalentes de la onda.



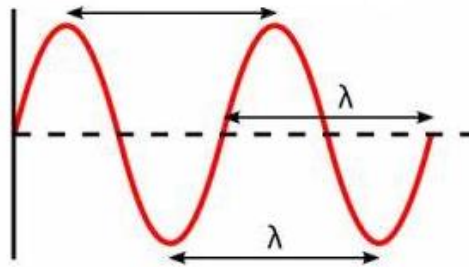
**Figura 20.** Periodo y amplitud de una onda. Fuente: (Ardizzi, 2011)

- **Frecuencia:** Magnitud que contabiliza las repeticiones por unidad de tiempo de un suceso periódico, dicha magnitud se contabiliza tomando un número de ocurrencias determinadas en un intervalo temporal. Cuando se producen menos sucesos en un periodo, la frecuencia será menor, por lo contrario, cuando los sucesos sean mayores en el mismo periodo, la frecuencia será mayor.



**Figura 21.** Ejemplo de ondas a menor y mayor frecuencia. Fuente: (Ricagno, 2018)

- Longitud de onda: Distancia recorrida por una perturbación periódica propagada por un medio, es la inversa de la frecuencia.



**Figura 22.** Longitud de onda. Fuente: <https://www.mundomicroscopio.com/longitud-de-onda/>

## 2.5. ANTECEDENTES

Conociendo los métodos no destructivos que se pueden utilizar en elementos y estructuras de madera, se destacan aquellos basados en la medición de ondas ultrasónicas.

En (Lee I.D.G., 1965) se utilizó la técnica de ultrasonidos para estudiar el grado de deterioro de una cubierta de madera en una casa del siglo XVIII. En (Muenow R.A., 1965) se utilizó dicha técnica para estudiar 11 secciones de madera que pertenecía a postes de tendido eléctrico de la Commonwealth Edison Company. En (Jeansen L.C., 1965) se usó la técnica para detectar la pudrición interna en postes de madera. En (McDonald *et al.*, 1978) se determinó la calidad de la madera en producción automatizada utilizando la técnica de ultrasonidos. En (Pellerin R.F., 1978) se indicó

que la velocidad de impulsos ultrasónicos se podía tomar como bien indicador de la calidad de la pieza ya que la velocidad decrecía a medida que aumentan los defectos en número y tamaño. En (Vanderbilt M.D. *et al.*, 1979) se utilizó la técnica de ultrasonidos para la evaluación de la resistencia y la rigidez de un gran número de postes de madera.

En (Arita K. y Kuratani K., 1984) estimaron la pudrición que se producía en los postes de madera de un camino, desarrollaron un método y aparato de ensayo llamado Wooden Pole Tester, el cual destaca por el uso de ondas ultrasónicas con las siguientes características, la primera es que revela la sección podrida del poste de madera y la segunda que analiza automáticamente la resistencia residual del mismo. Cabe destacar que los postes de madera utilizados en telecomunicaciones se evaluaban golpeando con un martillo el poste para posteriormente ser escuchado y pinchando con un punzón el poste para obtener respuestas.

Como conclusión de dicho estudio, se obtuvo que desarrollando un aparato con el que podamos realizar medición por ultrasonidos y representar gráficamente con un procesador matemático la zona afectada, conseguiremos un método seguro para analizar las pérdidas de resistencia ocasionadas por la pudrición en postes de madera. Por tanto, es bastante interesante y tiene mucho sentido con los objetivos que nos planteamos en el inicio de este trabajo de investigación.

En (Wayne Wilcox W., 1988) se publicó un denso trabajo que trataba de la detección temprana de los estados de pudrición de la madera a través de la velocidad con la que se propaga en esta especie el impulso ultrasónico. En dicho estudio se abordaron dos tipos de ensayos: conocer la velocidad de propagación en vigas de madera extraídas de un edificio y conocer la velocidad de transmisión en probetas pequeñas con un estado de pudrición provocado, ya que se han sometido al ataque de hongos. Los métodos que se utilizaron para la realización de los ensayos fueron:

- Transmisión en el sentido longitudinal de la fibra.
- Transmisión colocando los palpadores a 10 cm en la misma cara de la viga.
- Transmisión en sentido perpendicular a la fibra.

La conclusión que se obtiene de dicho estudio es que para analizar vigas por método de ultrasonidos tenemos que tener mucho cuidado con las muestras que tomamos, ya que dichos resultados pueden ser no válidos ya que la diferencia de velocidades era demasiado pequeña debido a la escasa longitud de las probetas, por tanto, los resultados que se obtuvieron deben de entenderse de manera que la diferencia entre los distintos estados fue demasiado pequeña, porque las probetas no daban lugar a experimentar nuevos cambios debido a su escasa dimensión.

Las publicaciones en España sobre ultrasonidos no son abundantes, aunque destacamos los estudios realizados por Arriaga F., los cuales son publicados en AITIM, concretamente hablamos sobre ``Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera``

El estudio realizado por Arriaga consistió en analizar 34 piezas de madera de las cuales 14 fueron pares de cubierta y 20 vigas del forjado, ambas con una antigüedad entre 90 y 130 años. Se realizó el estudio siguiendo las reglas de clasificación visual y aplicando las técnicas por ultrasonidos. La metodología seguida por Arriaga fue la siguiente:

Antes de empezar se realizó una medición exhaustiva y precisa de las características fundamentales de cada pieza, tomando minuciosamente las dimensiones de cada una de ellas, así como la dimensión de gemas, nudos, deformación remanente, desviación de la fibra y espesor de los anillos de crecimiento. Seguidamente se llevó a cabo la clasificación visual de las vigas conforme a las reglas de la comisión económica europea para seguir metódicamente la evaluación de los nudos.

Por último, se aplicó el ensayo por ultrasonidos realizado con el equipo Steinkamp-Ultrasonic Tester BPV, donde la frecuencia de onda ultrasónica se encuentra entre 40 kHz y 50 kHz, los palpadores son de forma cónica formados por puntas de acero inoxidable con transductor de circonato-titanio de plomo.

Las mediciones realizadas para conocer la velocidad de transmisión se llevaron a cabo tanto en la dirección paralela a la fibra como en la dirección perpendicular a la misma.

Se realizaron tres medidas en dirección perpendicular a la fibra para analizar los tiempos de transmisión, los puntos de los extremos de encontraban a 3 cm de los

mismos, mientras que el punto 2 se encontraba en punto medio de la sección, finalmente la velocidad se calculó haciendo la media de las tres posiciones.

Para analizar la velocidad en dirección paralela a la fibra se realizaron 6 medidas a diferencia de lo ocurrido en la dirección paralela a la fibra donde se realizaron 3, en estas, los palpadores se colocaron sin estar alineados y separados entre sí unos 110 y 100 cm, y con una desviación entre 6 o 7 grados respecto del eje. Del mismo modo que en las anteriores mediciones, la velocidad de propagación se obtuvo realizando la media entre las últimas medidas tomadas.

De esta manera, se puede analizar el módulo de elasticidad dinámico, la densidad del material y la velocidad de propagación.

## CAPÍTULO 3. MÉTODOS

Para realizar el estudio estructural y patológico de una edificación, se debe tener en cuenta factores tan importantes como la repercusión económica que requiere realizar ensayos tanto destructivos como no destructivos. Otro factor importante es el interés de la propia edificación, puesto que no tiene la misma relevancia un forjado de más de 100 años que se mantiene en buenas condiciones de seguridad, que un forjado ejecutado hace 20 años con multitud de patologías. Se debe de tener en cuenta siempre la intención de la propiedad, puesto que esta puede estar interesada en realizar una rehabilitación aun sabiendo el coste económico que supone, pero también se puede dar el caso de que la propiedad no esté interesada en rehabilitar y únicamente quiera sustituir la edificación por otra de obra nueva.

Por tanto, el alcance puede estar sujeto a los siguientes casos:

- Forjados con alto valor pertenecientes a edificios con interés cultural e histórico.

Son aquellos forjados que se encuentran en edificios patrimoniales, que si o si hay que buscar una vía de rehabilitarlos buscando la mejor opción para que salvaguarden su integridad de manera que se puedan observar todas las intervenciones realizadas en ellos, del mismo modo y sin perder nuestra intención que es obtener la mayor información posible sobre el estado de la estructura del edificio a través de los ensayos por ultrasonidos.

- Forjados con poco interés pero que la propiedad tenga intención de conservarlos.

Se puede dar el caso de que la propiedad quiera mantener la estructura original de la vivienda, aun asumiendo el incremento de coste económico que ello supone.

El estudio se ha realizado bajo el segundo caso, puesto que se refiere a una vivienda pequeña de un municipio de Granada con una antigüedad superior a 100 años en la



que el propietario tiene la intención de mantener la disposición del forjado por el valor constructivo e histórico que ello supone.

### **3.1. ESTUDIO PREVIO**

Es totalmente necesario hacer un estudio exhaustivo de la vivienda para comprobar medidas tan importantes como la accesibilidad, relevancia estructural y seguridad. Seguidamente se desarrolla el procedimiento llevado a cabo.

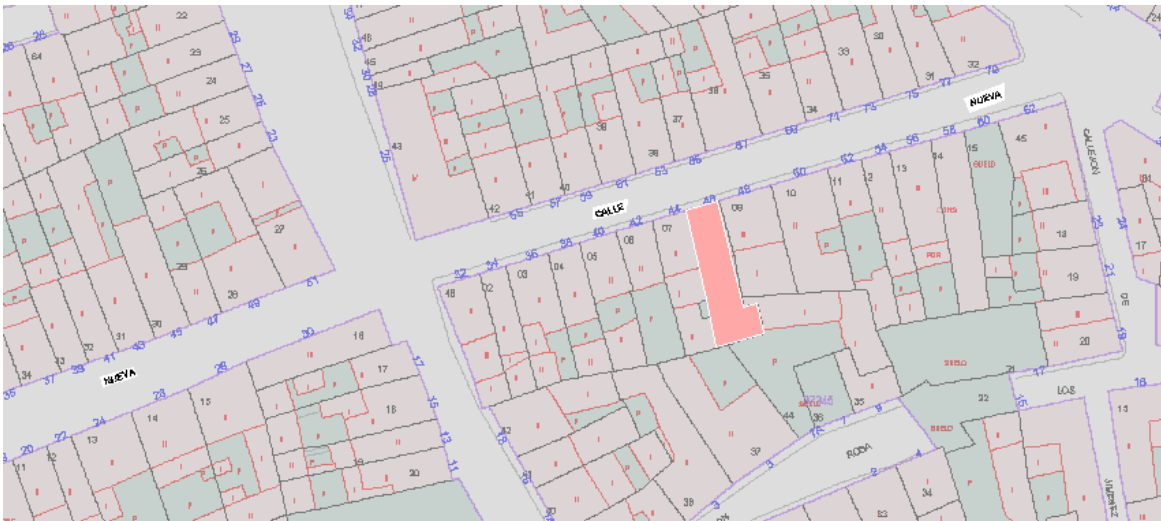
1. Datar la edad de la vivienda para tener información sobre los materiales constructivos.
2. Realizar un reportaje fotográfico de la vivienda para tener documentado en todo momento cada estancia y posible patología.
3. Realizar el levantamiento planimétrico de la vivienda referenciando la dirección de los forjados, distancia entre las vigas, secciones y longitud de las mismas.
4. Documentar los defectos y daños que contengan las vigas de la vivienda centrándose en las patologías de las mismas.
5. Nombrar todas las vigas de la vivienda.

### 3.2. DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN

El edificio está situado en el municipio de Pinos Puente en la Provincia de Granada, Calle Nueva nº46, como se indica en el plano de situación (Figuras 23 y 24).



**Figura 23.** Imagen aérea de Pinos Puente. Fuente: Google Maps



**Figura 24.** Plano catastral señalizando el contorno de la vivienda.

La vivienda consta de dos partes independientes con un patio como nexo de unión. Esto se debe a que la parte trasera del patio fue construida posteriormente debido a diversas necesidades por parte del propietario. El sistema constructivo estructural está resuelto a base de muros de carga de ladrillo sobre los que apoya un forjado de rollizos de madera de chopo. En la Figura 25 y 26 se muestra la división por estancias de la vivienda. Asimismo, se define la nomenclatura asignada a cada elemento y estancia.

Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.

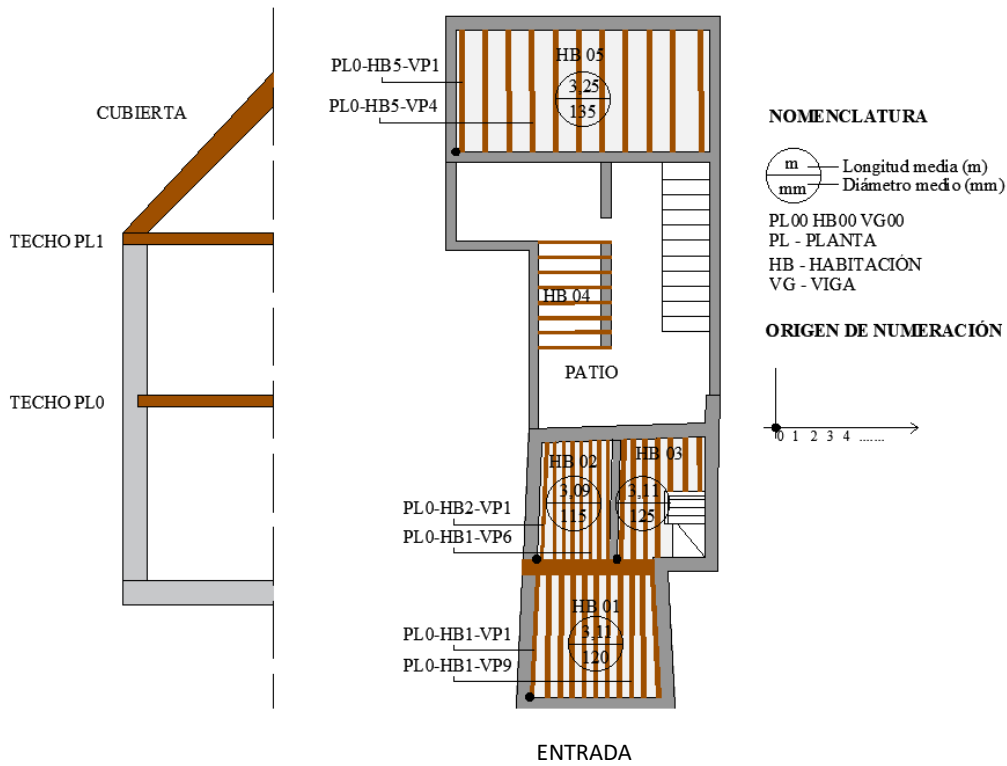


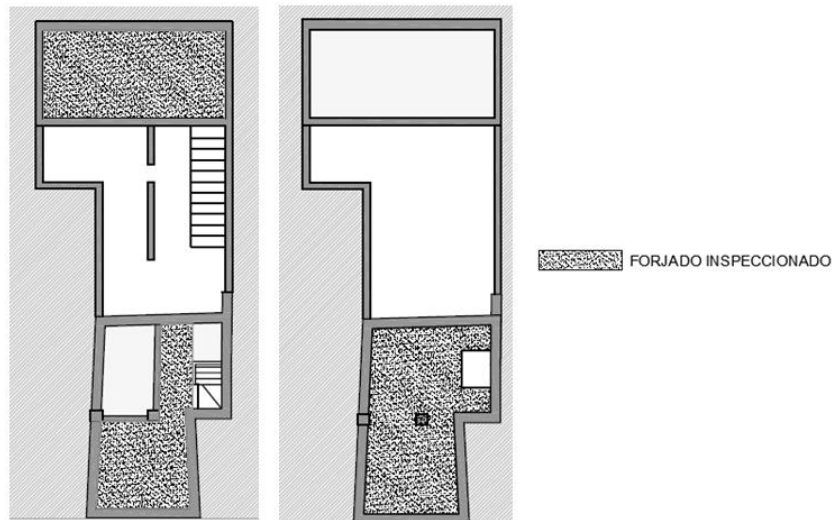
Figura 25. Izq.: Esquema de sección. Der.: Techo de PL0.



Figura 26. Izq.: Esquema de sección. Centro: Techo de PL1. Izq.: Cubierta.

Se han estudiado los forjados de la Planta 0 (PL0-HB01, PL0-HB03 y PL0-HB05) y de la Planta 1 (PL1-HB01 y PL1-HB02), tal y como se indica en la Figura 27, puesto que los forjados colindantes a dichas estancias son de similares características. Además estos

forjados presentan problemas de accesibilidad y seguridad en la medida. A continuación se describen las habitaciones estudiadas. La Tabla 2 recoge un resumen de los forjados analizados, así como posibles observaciones en cada uno de ellos.



**Figura 27.** Izq.: Forjados inspeccionados en PL0. Der.: Forjados inspeccionados en PL1.

PLANTA	FORJADO	Nº VIGAS	NOMENCLATURA	OBSERVACIONES
0	1	11	PL0-HB1	Las vigas laterales se encontraban empotradas en la pared, se realizó únicamente medida longitudinal por uno de sus lados, no pudiéndose efectuar medida transversal.
0	3	4	PL0-HB3	Las viga lateral VP1 se encontraba empotrada en la pared, se realizó únicamente medida longitudinal por uno de sus lados, no pudiéndose efectuar medida transversal.
0	5	11	PL0-HB5	Las viga lateral VP1 se encontraba totalmente encastrada en la pared, mientras que la viga VP11 se encuentra empotrada y se puede realizar medida longitudinal. En ambas vigas no se pueden realizar medida transversal. Esta habitación presenta patología por humedad.
1	1	4	PL1-HB1	Las vigas laterales presentan problemas de accesibilidad imposibilitando la medida transversal.
1	2	5	PL1-HB2	La viga lateral VP1 se encontraba empotrada en la pared y por tanto no se puede realizar medida transversal.

**Tabla 3.** Resumen de las estancias de la vivienda.

- PLO-HB01

Esta habitación presenta forma rectangular de 3,31 x 3,01 m<sup>2</sup> y una altura de forjado (suelo-cara inferior del forjado) de 2,85 m. El forjado se compone de once rollizos de madera de chopo con sección variable entre 10,7 cm y 12,1 cm, e intereje de 25 cm. Como elemento de entrevigado se dispone una tablazón de madera clavado a la vigería.



**Figura 28.** Vista del forjado PLO-HB1.

- PLO-HB03

Esta habitación tiene la misma estructura que la anterior, ya que se encuentra a continuación de la misma, corresponde al pasillo que comunica el patio con la habitación 01. Esta consta de cuatro rollizos de madera y tiene unas dimensiones de 3,02 x 1,07 m<sup>2</sup>.

- PLO-HB05

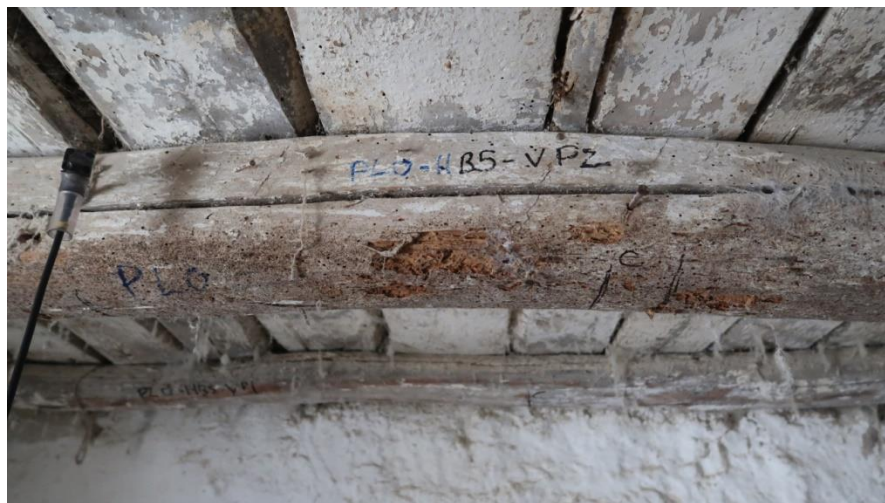
Esta estancia se encuentra en la zona posterior de la vivienda y tiene una disposición rectangular de 6,45 x 3,01 m<sup>2</sup>. El forjado se compone de once rollizos de madera con sección variable entre 12,6 cm y 14,5 cm, e intereje de 44 cm. Como elemento de entrevigado se dispone de una tablazón semejante a HB01. En dicha habitación la tablazón presenta diversas oquedades y por ello las vigas de la misma contienen patologías procedentes de la humedad, presentando carcoma en prácticamente todas las vigas de la estancia, así como importantes fendas que pueden



afectar a la resistencia de la viga, como se observó en la Figura 29. La construcción de esta estancia fue posterior al núcleo principal de la vivienda.



**Figura 29.** Vista del forjado PL0-HB5.



**Figura 30.** Presencia de humedad, fendas y carcoma en la viga VP2, PL0-HB5.

- PL1-HB01

Esta habitación contiene cuatro vigas horizontales y doce vigas inclinadas que realizan la función de formación de pendientes de cubierta. Tiene unas dimensiones de 3,31 x 3,09 m<sup>2</sup>. Las vigas horizontales apoyan sobre una partición de ladrillo que separa las dos habitaciones de la planta alta de la vivienda (Figura 31). Al igual que en las

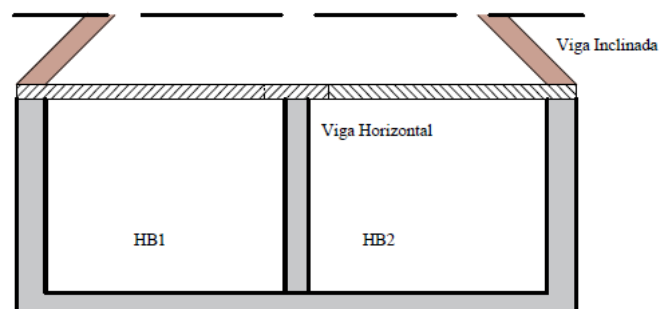
habitaciones anteriores las vigas están formadas por rollizos de madera de chopo. En dicha habitación se midieron únicamente las vigas horizontales.

- PL1-HB02

Es la habitación colindante a la anterior y mantiene la misma disposición con cinco vigas horizontales y catorce vigas inclinadas. La dimensión de dicha habitación es de 4,26 x 3,06 m<sup>2</sup>. Las vigas horizontales de la misma apoyan en la misma partición que las vigas de la habitación anterior. En dicha habitación al igual que en la anterior se midieron las vigas horizontales, debido a que la accesibilidad era muy reducida y no se pudo obtener las medidas adecuadas por seguridad.



**Figura 31.** Vista del forjado PL1-HB1.



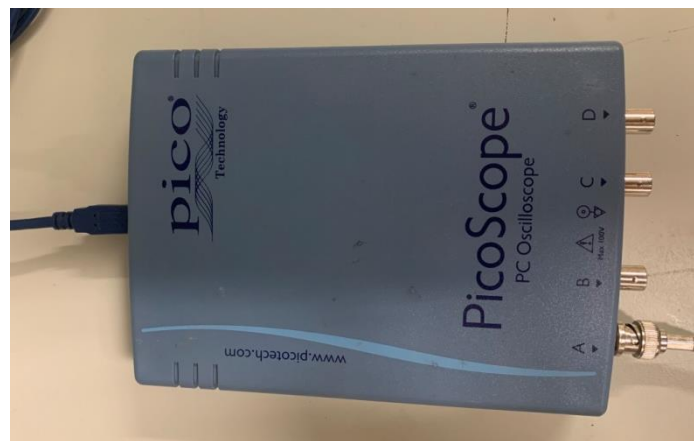
**Figura 32.** Esquema de PL1.

### 3.3. EQUIPOS DE MEDIDA

Para la realización de la inspección por ultrasonidos se han utilizado los siguientes equipos:

- PicoScope 4424

El osciloscopio PC de alta precisión 4424 de PICOSCOPE está diseñado para reunir los requerimientos de la ingeniería moderna de servicio, diseño y desarrollo. Es un equipo adecuado para realizar ensayos in-situ, ya que es portátil. Este equipo nos da la lectura del tiempo de retardo en que la onda sale del palpador emisor hasta que es recibido por el palpador receptor. Con su alta resolución de entrada, puede detectar o activar en cambios de tensión menores de  $50 \mu\text{V}$ . Esto lo hace ideal para aplicaciones electromecánicas como monitorización de transductores, y para análisis espectral de audio, ruido y vibración.



**Figura 33.** Osciloscopio PicoScope 4424.

- Sensor Fakopp SD-02

Sensor piezoeléctrico diseñado para tener una relación señal/ruido baja y al mismo tiempo ser lo suficientemente robusto para soportar golpes de martillo. La frecuencia propia es de 45 kHz. Los sensores van conectados mediante dos cables coaxiales al osciloscopio, y este a su vez al ordenador donde se muestran los resultados obtenidos.



Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.



**Figura 34.** Sensor Fakopp SD-02.

- Medidor de humedad Surveymaster SM PROTIMETER

El Surveymaster es el medidor de Neurtek para inspeccionar e investigar la humedad en edificios. Dicho dispositivo mide la humedad de la superficie y del interior de la pieza, esta información es esencial cuando se trata de establecer la extensión y la causa de un problema de humedad, puesto que como se ha comentado anteriormente, las propiedades mecánicas de la madera dependen de la humedad. El contenido de humedad real de la madera se muestra en la pantalla digital con la condición de humedad correspondiente en la escala adjunta de luces codificadas por colores.



**Figura 35.** Medidor de humedad Surveymaster SM PROTIMETER.

- Barrena de extracción de microcores

Para medir la densidad de las piezas, se ha realizado la extracción de microcores con una barrena Trepbor 35 de 4 mm de diámetro, una vez que es extraído el fragmento de madera de chopo se pesa con una báscula, concretamente se ha utilizado una báscula de precisión 0,001 g, por último se mide la longitud de la pieza con un calibre digital. Una vez obtenido el diámetro de la pieza, su longitud y su peso, se calcula la densidad de la pieza.

$$P_i = m_i / v_i$$

donde  $m$  es la masa y  $v$  el volumen e  $i$  es cada elemento medido.



**Figura 36.** Barrena Trepbor 35 de 4mm para extracción de microcores.

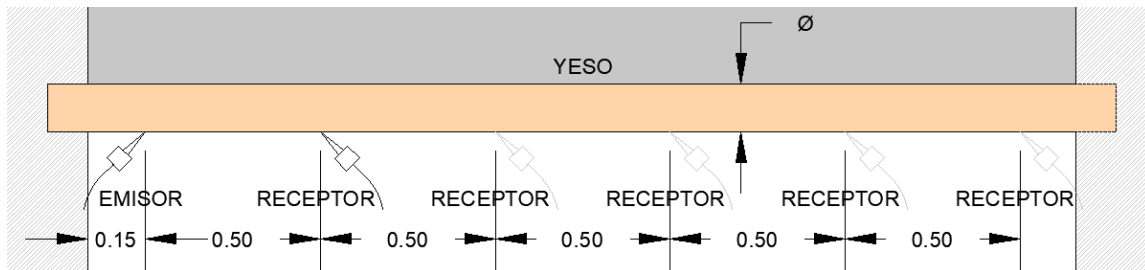
### 3.4. MEDIDAS EN LOS FORJADOS

Se han realizado dos tipos de medidas, medida longitudinal (dirección de la fibra) y medida transversal (perpendicular a la fibra).

#### 1. Medidas longitudinales

En cada viga se han tomado medidas por ambos lados del rollizo, concretamente se han realizado cinco medidas por cada lado de la pieza, colocando el sensor emisor a 15 cm del apoyo puesto que éstas se encuentran empotradas en el muro e imposibilita la realización de la medición justo en la cabeza de la misma, facilitando el clavado del sensor. El sensor receptor se coloca primeramente a 50 cm

del sensor emisor, desplazándolo en cada una de las medidas consecutivas 50 cm. Los sensores se posicionan con un ángulo de 45°, enfrentados entre sí y clavándolos 2,5 cm en la pieza, tal y como se indica en la Figura 37.

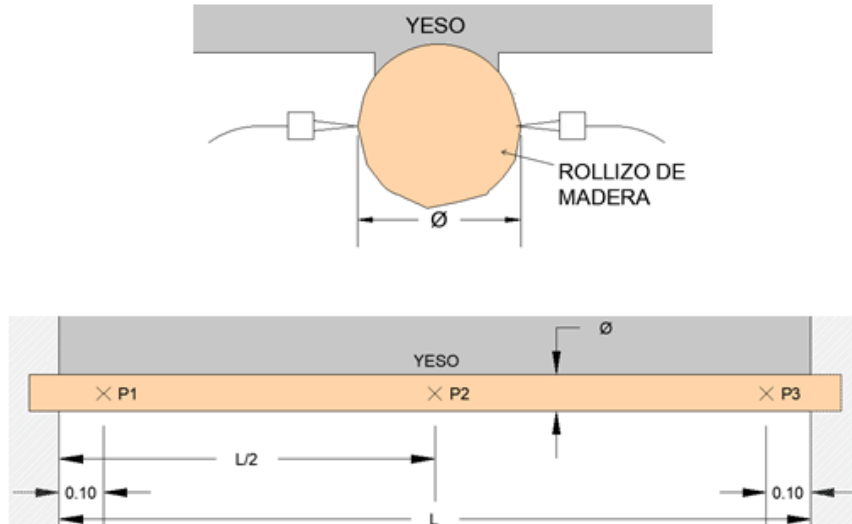


**Figura 37.** Medida longitudinal en rollizos de madera. Medidas en metros.

## 2. Medidas transversales

Una de las patologías más comunes que presentan las estructuras de forjados de madera es la pudrición en las cabezas de las vigas empotradas, aunque con el tiempo se acaban desplazando a toda la pieza. Por ello en el estudio realizado se han tomado medidas transversales a la fibra de la pieza a 10 cm de los muros donde están se encuentran empotradas. Como referencia se encuentran los estudios realizados en (Arita K. y Kuratani K., 1984) en los que se utilizó la misma técnica para conocer la pudrición de la parte enterrada del poste, tomando medidas lo más próximas posibles a dicha zona.

Por ello, se han realizado tres medidas transversales en la viga de madera, en los extremos de la viga a 10 cm del muro y en la parte central de la pieza. Los sensores se han colocado con un ángulo de 90°, alineados entre sí y clavados 1,5 cm en la pieza como se observa en la Figura 38. Al tratarse de rollizos de madera de sección irregular, fue necesario medir el diámetro justo en cada punto de inspección.



**Figura 38.** Medida transversal en rollizos de madera. Medidas en metros.

### 3.5. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

El método de ultrasonidos nos permite conocer el estado en el que se encuentra la madera, puesto que los defectos y singularidades de la pieza que estamos estudiando reducen la velocidad de propagación de la onda y producen cambios madera-aire en toda su sección. A partir de datos como la densidad, la longitud y la geometría de la pieza se puede calcular el MoE, ya que existe una relación directa con la velocidad de propagación de la onda, de la forma:

$$V_i = d/t$$

$$\text{MoE}_i = \rho_i \cdot v_i^2$$

$$\text{MoE} = \sum \text{MoE}_i / i$$

donde  $v$  es la velocidad de propagación longitudinal de las ondas ultrasónicas a través de la madera,  $d$  es la distancia entre sensores que varía de 50 a 250 cm,  $t$  es el tiempo que tarda la onda en viajar desde el sensor emisor al receptor,  $\rho$  es la densidad de la viga ensayada e  $i$  es cada elemento medido.

Todos los valores del módulo de elasticidad se corrigen a una referencia del 12% de humedad según la Norma UNE-EN 384. Para el módulo de elasticidad la corrección será del 2% por cada variación del 1% del contenido de humedad.

La corrección por humedad se ha efectuado en la metodología empleada para el cálculo del módulo de elasticidad de la siguiente forma:

$$E_0 = E_0(u) (1+0,01(u-u_{ref}))$$

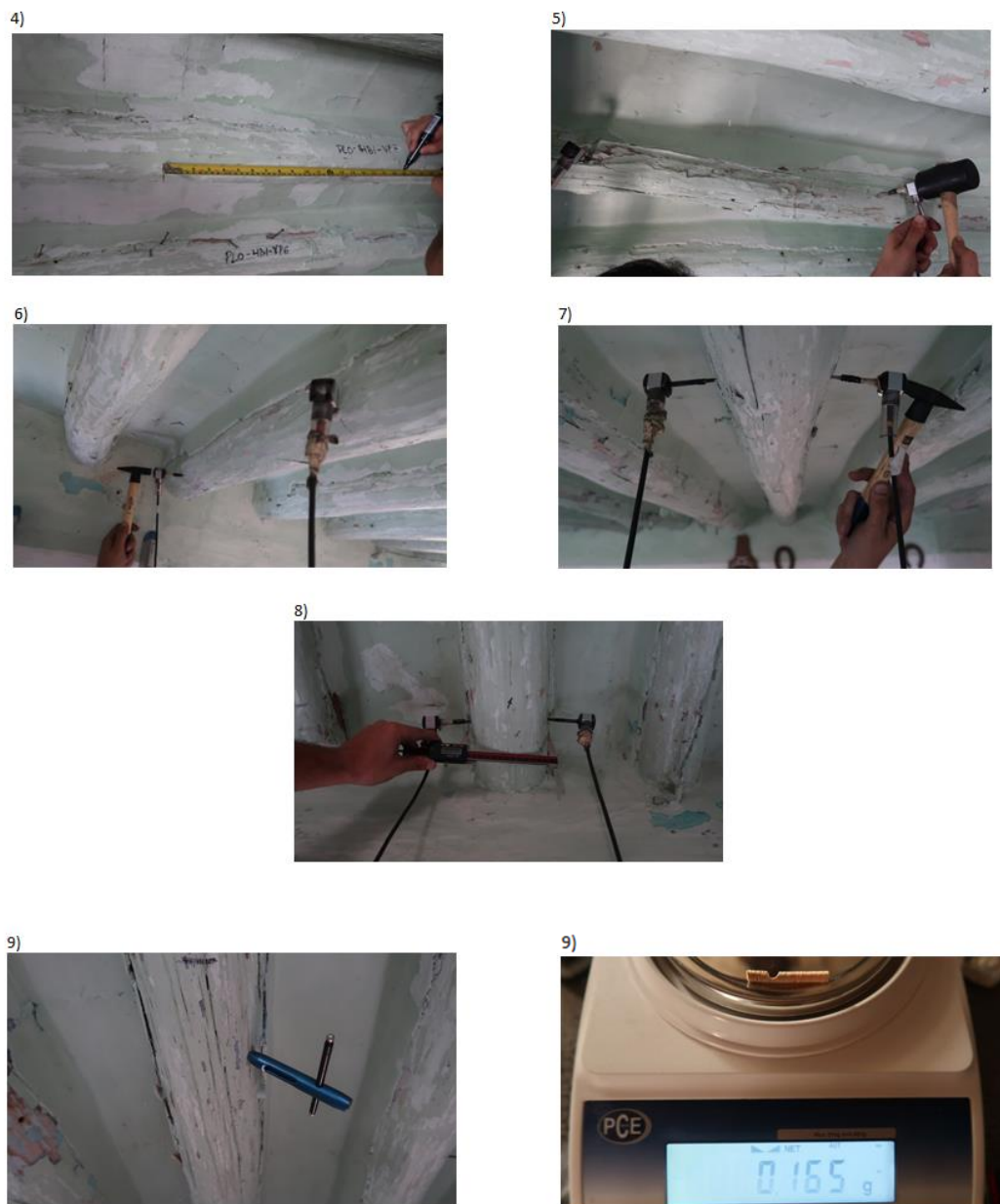
Donde  $E_0$  es el módulo de elasticidad en flexión paralela a la fibra,  $u$  es el contenido de humedad en el momento del ensayo ( $8\% < u < 18\%$ ) e  $u_{ref}$  es el contenido de humedad de referencia (12%).

### 3.6. PROCESO DE MEDIDA

Para realizar las medidas que se han comentado en el apartado anterior, se han seguido el proceso que se detalla a continuación:

1. Identificación de todas las vigas de la vivienda.
2. Medición de la humedad del ambiente y la temperatura de la estancia en la que se realiza la inspección, tanto al principio como al final del estudio.
3. Medición de la humedad de la pieza en cinco puntos.
4. Marcado de los puntos donde se clavan los sensores.
5. Clavado de los sensores emisor y receptor en los puntos marcados.
6. Realización de las medidas longitudinales por ambos lados.
7. Realización de las medidas transversales.
8. Medida del diámetro en cada punto del Paso 7.
9. Extracción de una microcore en cada viga. Midiendo su longitud con calibre digital y pesándose con una báscula de precisión.
10. Tratamiento y análisis de los datos obtenidos.

Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.



**Figura 39.** Proceso de medida.

Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS**

### **4.1. ANÁLISIS DEL TECHO DE LA PLANTA 0**

En los resultados se diferencia entre vigas laterales e internas. Las vigas laterales son aquellas que se encuentran encastradas o semi-encastradas en el muro perimetral de la estancia. En HB0, la viga VP1 se encuentra totalmente encastrada en la pared, dejando visible menos de la mitad de su sección. La viga VP11 se encuentra semi-encastrada. Ambas tienen por lo tanto condiciones de contorno diferentes a las vigas denominadas internas. En el caso de HB5, la viga VP11 se encuentra libre prácticamente en su totalidad, pero gravemente afectada por humedad.

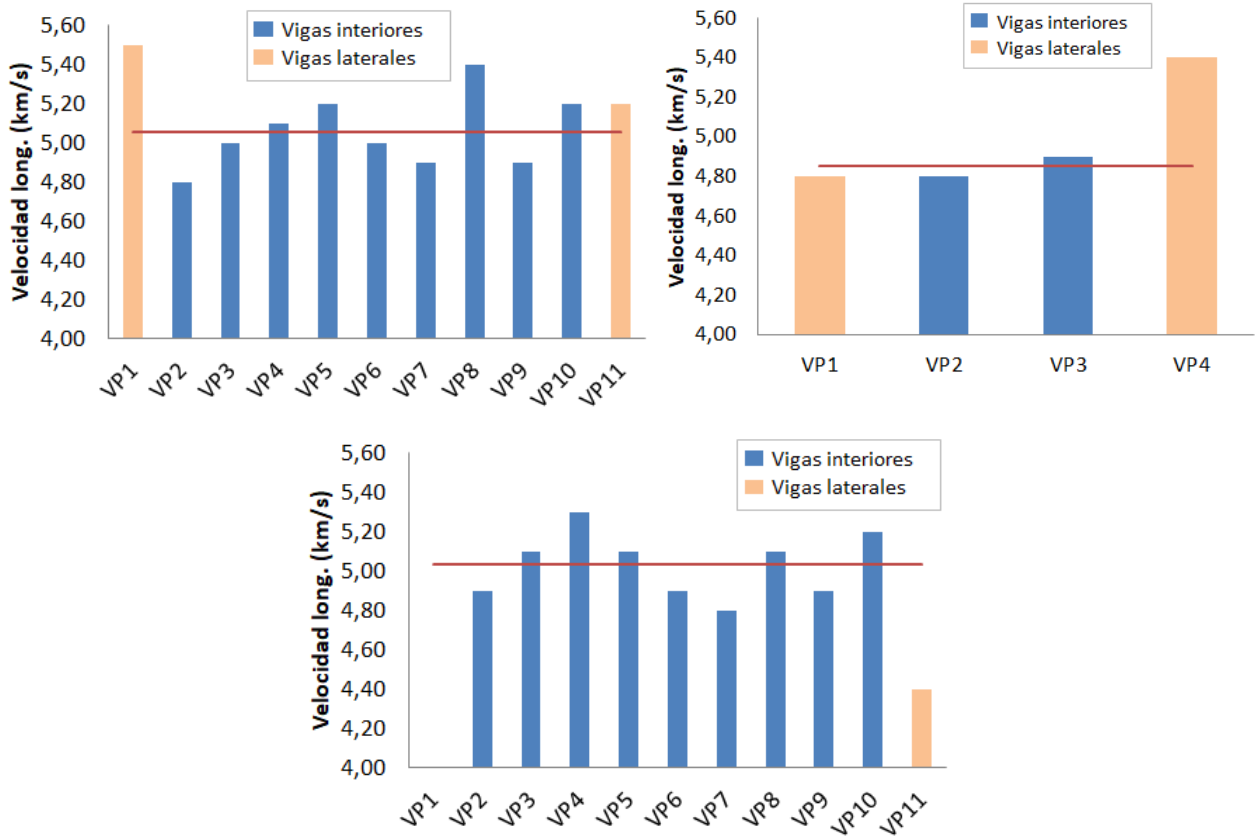
Las Tablas 3, 4 y 5 recogen la velocidad de propagación media, la humedad, la densidad, el MoE y el MoE con corrección de humedad de cada una de las vigas (MoE\*).

#### **4.1.1. MEDIDAS LONGITUDINALES**

En la Figura 40, se observa que la viga HB1-VP1 presenta la mayor velocidad de propagación para su estancia, diferenciándose así de la viga opuesta en el otro lado de la habitación, la viga HB1-VP11, donde la velocidad es semejante a la media, esto puede asociarse al encastramiento en la pared de la viga HB1-VP1 aportándole una rigidez mayor ya que su valor de densidad se encuentra en la media. La viga VP8 presenta una velocidad de propagación de 5.4 km/s, siendo la más alta de las vigas internas, además de ser la que menos porcentaje de humedad presenta en dicha habitación. En el caso de la HB3, se aprecia como la viga VP4 presenta la velocidad de propagación más alta, coincidiendo con el porcentaje de humedad más alto de la habitación. Las dos vigas internas presentan bastante similitud entre ellas. En el caso de HB5 se puede observar una relativa homogeneidad entre las vigas internas, mientras que la viga HB5-VP11 que se encuentra pegada a la pared pero no encastrada presenta el valor más bajo de las tres habitaciones estudiadas. Mediante inspección visual se comprobó que esta viga estaba gravemente afectada por humedad arrojando un valor del 13,3%, que es un 40% mayor que la de la media de la estancia. La estancia



HB1 como la HB5, tienen la misma velocidad de propagación media, a pesar de que la HB5 arroja un 4,4% más de humedad media que la HB1.



**Figura 40.** Velocidad longitudinal. Izq.: HB1. Der.: HB3. Centro: HB5. Línea roja: valor medio de vigas interiores.

#### 4.1.2. MEDIDA DE DENSIDAD

Posterior a las medidas longitudinales, se realizó la extracción de microcores en cada una de las vigas de la PL0. En HB0, se extrajeron 2 microcores de las vigas VP1, VP7 y VP10, debido a la dificultad de extracción y rotura parcial del microcore. Para estas vigas se ha obtenido la media de las 2 microcores. Por el mismo motivo en HB5 se extrajeron 2 microcores de las vigas VP3 y VP11 obteniendo la media de ambos. En la viga VP10, el microcore tenía un canal posiblemente asociado a carcoma, puesto que como bien se ha comentado anteriormente, dicha habitación estaba afectada por

la humedad. Esto hace que la densidad de todo el microcore fuese de  $360 \text{ g/cm}^3$ , mientras que la densidad eliminando la oquedad fue de  $430 \text{ g/cm}^3$ .

Tal y como se observa en la Figura 41, HB1 presenta los valores medios más bajos de las tres estancias, comparando dichos valores con la HB5, vemos una diferencia sustancial del 14,6%, lo que nos da a entender que las vigas no pertenecen a la misma plantación, observamos también la diferencia que aparece en cuanto el diámetro medio de las piezas. Tal y como se puede apreciar la viga HB1-VP9 presenta una densidad mucho mayor que el resto de vigas, sin embargo, esta densidad es similar a 4 de las vigas de HB5. En esta estancia, el menor valor lo presenta la viga VP11, debido principalmente por el deterioro del material a causa de la afección por humedad. HB3 presenta una densidad promedio entre HB5 y HB1.

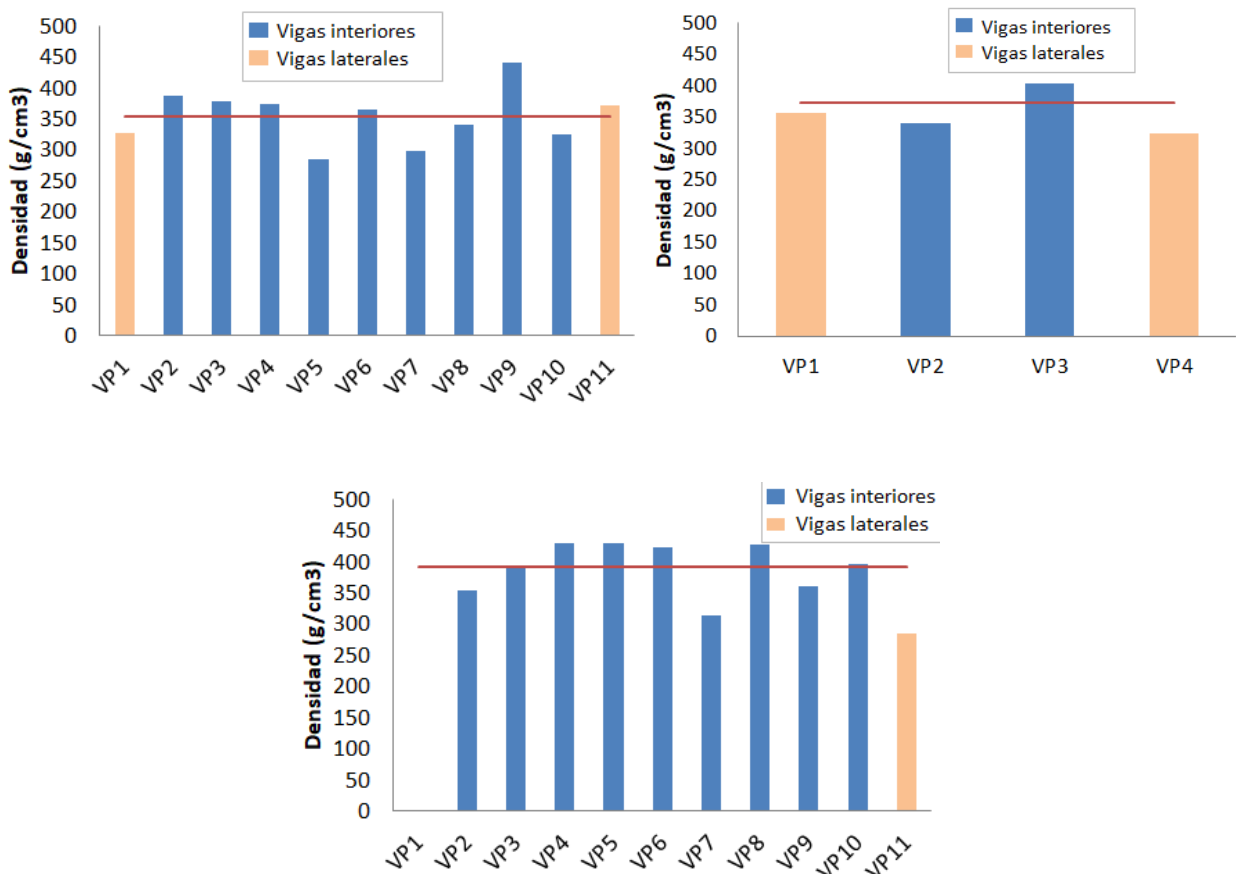


Figura 41. Densidad. Izq.: HB1. Der.: HB3. Centro: HB5. Línea roja: valor medio de vigas interiores.

#### 4.1.3. MEDIDA DE MÓDULO DE ELASTICIDAD

Como bien se puede observar en la Figura 42, en HB0 las vigas presentan relativa homogeneidad teniendo en cuenta que es madera en rollo, destacando el MoE de la viga VP9, la cual obtuvo la mayor densidad. Por el contrario, las vigas VP5 y VP7 son las que presentan menor MoE (7555 y 7126 MPa, respectivamente), siendo además su densidad la más baja de toda la habitación, esto puede deberse a la presencia de fendas y nudos que presentaba dicha pieza, y que se puede comprobar en las hojas de campo incluidas en el Anexo. Las vigas internas de HB3 presentan valores muy similares a HB1, puesto que son habitaciones contiguas con bastante similitud en cuanto a su tipología de construcción. En HB5 se observa una mayor heterogeneidad, distinguiéndose dos grupos (descartando VP11): 1) Vigas VP2-VP6, VP8 y VP10 con un MoE medio de 10932 MPa; 2) Vigas VP2, VP7 y VP9 con un MoE medio de 8199 MPa. Esto se traduce en una diferencia del 33% del grupo 1 respecto del grupo 2. Esta diferencia podría asociarse al mayor deterioro de las vigas del grupo 2 debido a la carcoma. Es remarcable el valor de MoE que arroja la viga VP11, siendo un 44,7% inferior a las demás vigas de la habitación, esto se debe al alto porcentaje de humedad que presenta dicha viga, lo cual se correlaciona con la inspección visual. Si se compara la HB5 con la HB1, se observa una gran diferencia entre los valores medios de MoE, concretamente un 10,4% superior en HB5 que en HB1, esto puede asociarse a que la corteza de HB5 presentaba mayor edad al cortarse que los rollizos de HB1 y HB3.

Referente a la humedad es importante notar que las vigas de HB5 presentan una humedad un 4,4% mayor con respecto HB0, destacando las dos vigas laterales en HB5, alcanzando HB5-VP11 una humedad del 13.3%. Este dato justifica claramente su bajo valor de MoE. Pese a que HB3 se midió con una temperatura ambiente mayor, el contenido de humedad de la madera prácticamente no varió respecto de HB1 y HB5.

Respecto al módulo de elasticidad con corrección de humedad se presenta la misma tendencia en las tres estancias, debido principalmente a que pese a que las medidas no se realizaron en las mismas condiciones de temperatura y humedad ambiental, el contenido de humedad de la madera apenas varió, ya que las diferentes inspecciones

se realizaron con una pequeña diferencia temporal entre sí. El MoE\* es menor que el MoE porque la humedad registrada estaba por debajo de la humedad de referencia del 12%.

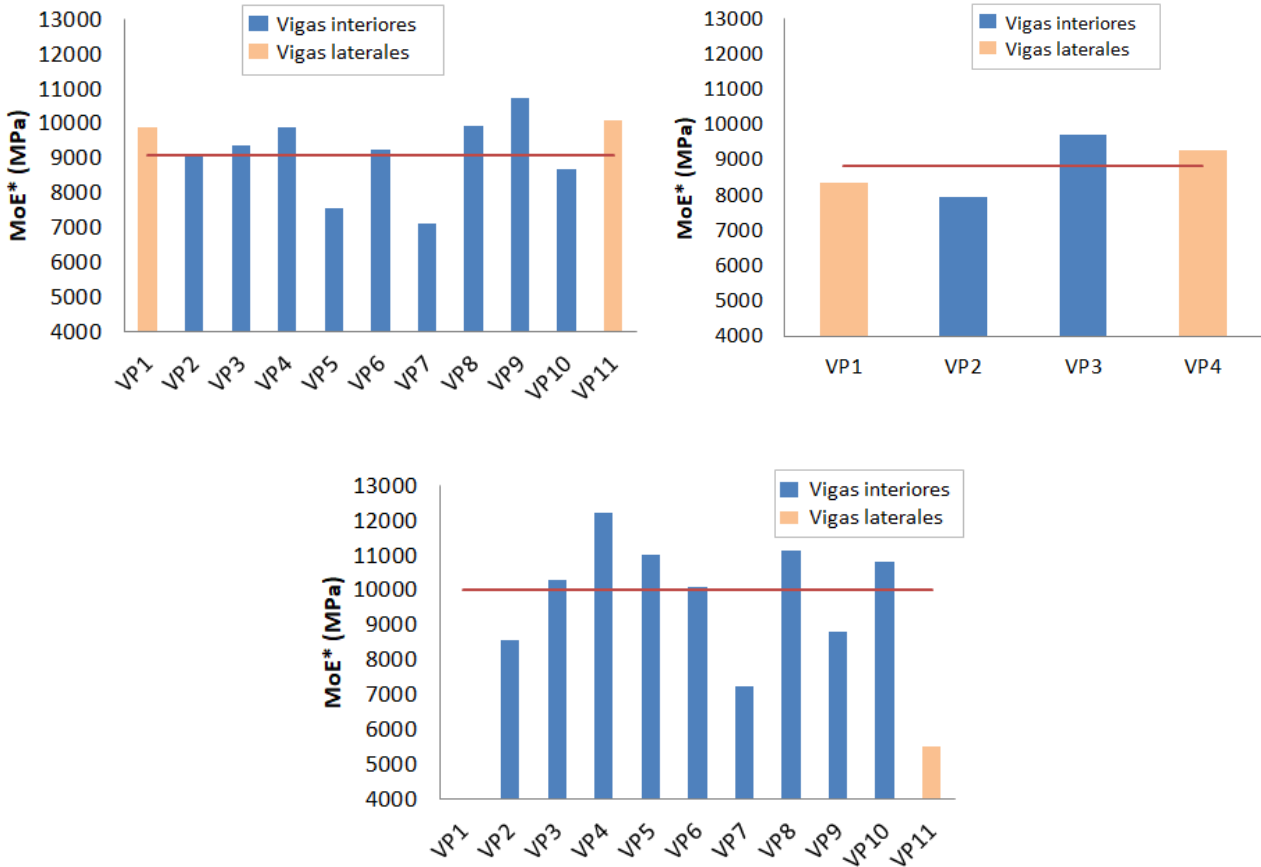


Figura 42. MoE\*. Izq.: HB1. Der.: HB3. Centro: HB5. Línea roja: valor medio de vigas interiores.

HB1	V (km/s)	$\phi$ medio (mm)	Humedad media (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	MoE (Mpa)	MoE* (MPa)
PLO_HB1_VP1_MEDIO	5,5	-	9,3	326,9	9897	9626
PLO_HB1_VP2_MEDIO	4,8	119,8	9,6	387,4	9088	8868
PLO_HB1_VP3_MEDIO	5,0	121,5	9,1	377,9	9397	9128
PLO_HB1_VP4_MEDIO	5,1	116,2	9,2	375,6	9917	9635
PLO_HB1_VP5_MEDIO	5,2	118,9	9,0	284,8	7555	7326
PLO_HB1_VP6_MEDIO	5,0	114,8	9,2	365,6	9241	8981
PLO_HB1_VP7_MEDIO	4,9	121,0	9,2	298,1	7126	6923
PLO_HB1_VP8_MEDIO	5,4	119,2	8,8	340,9	9925	9605
PLO_HB1_VP9_MEDIO	4,9	107,9	9,2	441,1	10760	10459
PLO_HB1_VP10_MEDIO	5,2	112,2	9,0	325,2	8680	8418
PLO_HB1_VP11_MEDIO	5,2	-	9,3	373,4	10102	9831
<b>PROMEDIO VP2-VP10</b>	<b>5,1</b>	<b>116,8</b>	<b>9,1</b>	<b>341,8</b>	<b>9077</b>	<b>8816</b>

Tabla 4. Resultado de PLO-HB1.

HB3	V (km/s)	$\phi$ medio (mm)	Humedad media (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	MoE (Mpa)	MoE* (MPa)
PLO_HB3_VP1_MEDIO	4,8		9,3	357	8338	8110
PLO_HB3_VP2_MEDIO	4,8	113,8	9,2	341	7960	7739
PLO_HB3_VP3_MEDIO	4,9	104,5	9,3	403	9726	9463
PLO_HB3_VP4_MEDIO	5,4	116,2	9,0	324	9272	8994
<b>PROMEDIO VP2-VP3</b>	<b>4,9</b>	<b>109,2</b>	<b>9,3</b>	<b>372,4</b>	<b>8843</b>	<b>8601</b>

Tabla 5. Resultados de PLO-HB3.

HB5	V (km/s)	$\phi$ medio (mm)	Humedad media (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	MoE (Mpa)	MoE* (MPa)
PLO_HB5_VP1_MEDIO	-	-	11,5			
PLO_HB5_VP2_MEDIO	4,9	145,5	9,1	353,4	8554	8303
PLO_HB5_VP3_MEDIO	5,1	136,1	9,2	391,1	10313	10024
PLO_HB5_VP4_MEDIO	5,3	148,6	9,4	429,3	12217	11896
PLO_HB5_VP5_MEDIO	5,1	132,0	9,8	429,9	11006	10761
PLO_HB5_VP6_MEDIO	4,9	129,4	9,8	424,1	10079	9860
PLO_HB5_VP7_MEDIO	4,8	126,5	9,7	313,6	7240	7076
PLO_HB5_VP8_MEDIO	5,1	138,0	9,6	427,8	11150	10878
PLO_HB5_VP9_MEDIO	4,9	134,5	9,9	360,7	8802	8620
PLO_HB5_VP10_MEDIO	5,2	138,0	9,4	396,6	10827	10542
PLO_HB5_VP11_MEDIO	4,4	-	13,3	285,9	5535	5605
<b>PROMEDIO VP2-VP10</b>	<b>5,1</b>	<b>136,5</b>	<b>9,5</b>	<b>391,8</b>	<b>10021</b>	<b>9773</b>

Tabla 6. Resultados de PLO-HB5.

#### 4.1.4. MEDIDAS TRANVERSALES

Con el fin de evaluar la atenuación, se ha calculado la relación entre voltaje pico del sensor emisor ( $V_{pp,Em}$ ), voltaje pico del sensor receptor ( $V_{pp,Re}$ ) y distancia entre sensores ( $D_{sensores}$ ) según:

$$V_{pp,Em}/(V_{pp,Re} * D_{sensores})$$

En líneas generales HB0 presenta menores valores de velocidad transversal comparados con HB5. En HB0, en la viga VP3-P1 se encuentra una zona con una baja velocidad transversal respecto del resto de puntos. El P2 de la viga VP7 de igual forma presenta una menor velocidad de transmisión respecto de los colindantes. Además esta viga es la que mayor velocidad transversal arroja siendo la que menor MoE obtuvo. Respecto de HB5, destacan los encuentros con muros de la viga VP3 (Puntos 1 y 3) con bajos valores de velocidad transversal. La viga 2 de HB3 presenta una clara homogeneidad mientras que la viga VP3 presenta una baja velocidad de transmisión con respecto el resto de puntos.

Respecto de la relación entre voltajes y distancia entre sensores, la habitación HB0 presenta en líneas generales valores ligeramente más bajos que HB5. Un valor mayor de este parámetro indica una mayor atenuación entre sensor emisor y receptor y por lo tanto, mayor deterioro del material. Destacan en HB0 los puntos centrales de las vigas VP3 y VP5 alcanzando una ratio hasta 0.57. En el caso de HB5, se observa una gran diferencia entre los puntos de las vigas VP2, VP5 y VP6, destacando VP10 la cual arroja en P1 el mayor valor de la estancia y en P3 el menor valor, siendo además muy similar a los valores de HB0-VP2. De la viga HB5-VP10 se extrajo el microcore con un canal provocado por carcinoma, pudiendo ser la presencia de esta la causa de esta gran disparidad entre los 3 puntos. Los valores de las vigas de HB3 se encuentran en la media del resto de estancias, claramente destacando el punto 3 de VP3, pudiendo asociarse a un deterioro del material en dicha zona.

Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.

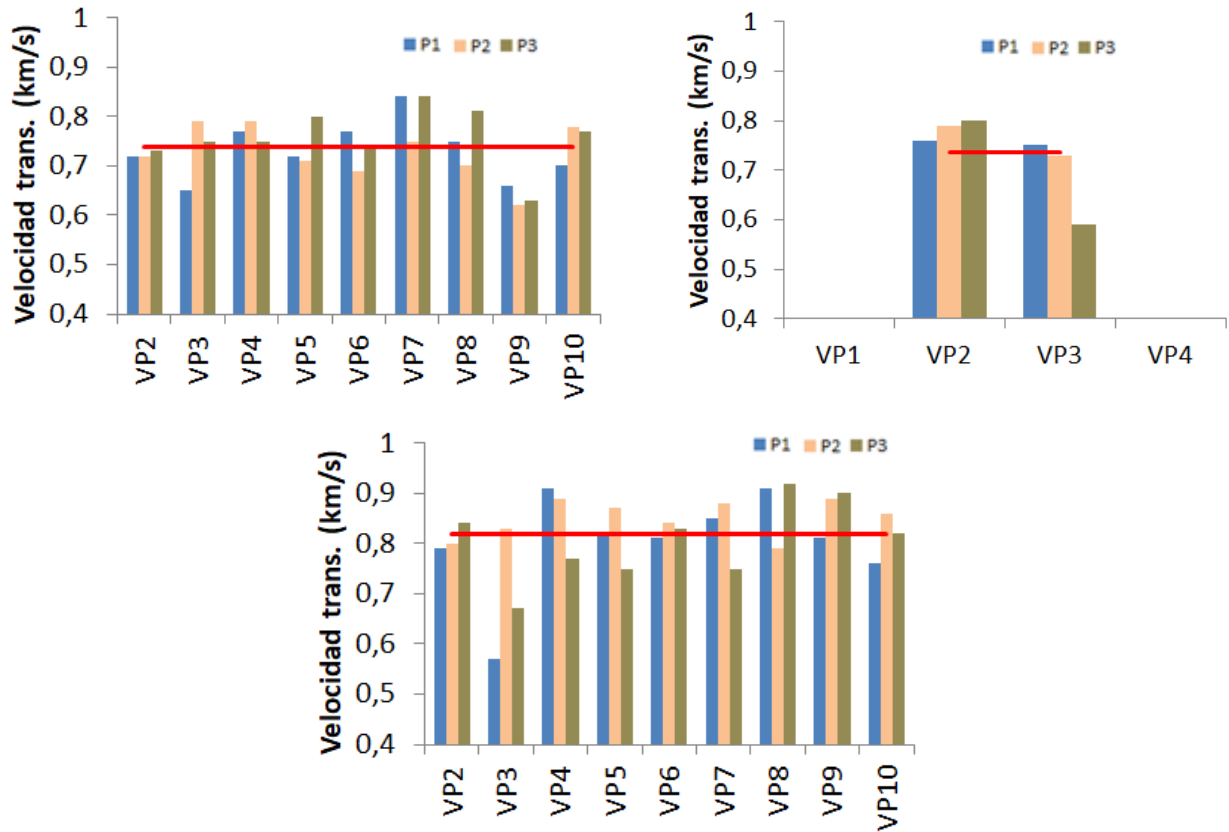


Figura 45. Velocidad transversal. Izq.: HB1. Der.: HB3. Centro: HB5. Línea roja: valor medio de vigas interiores.

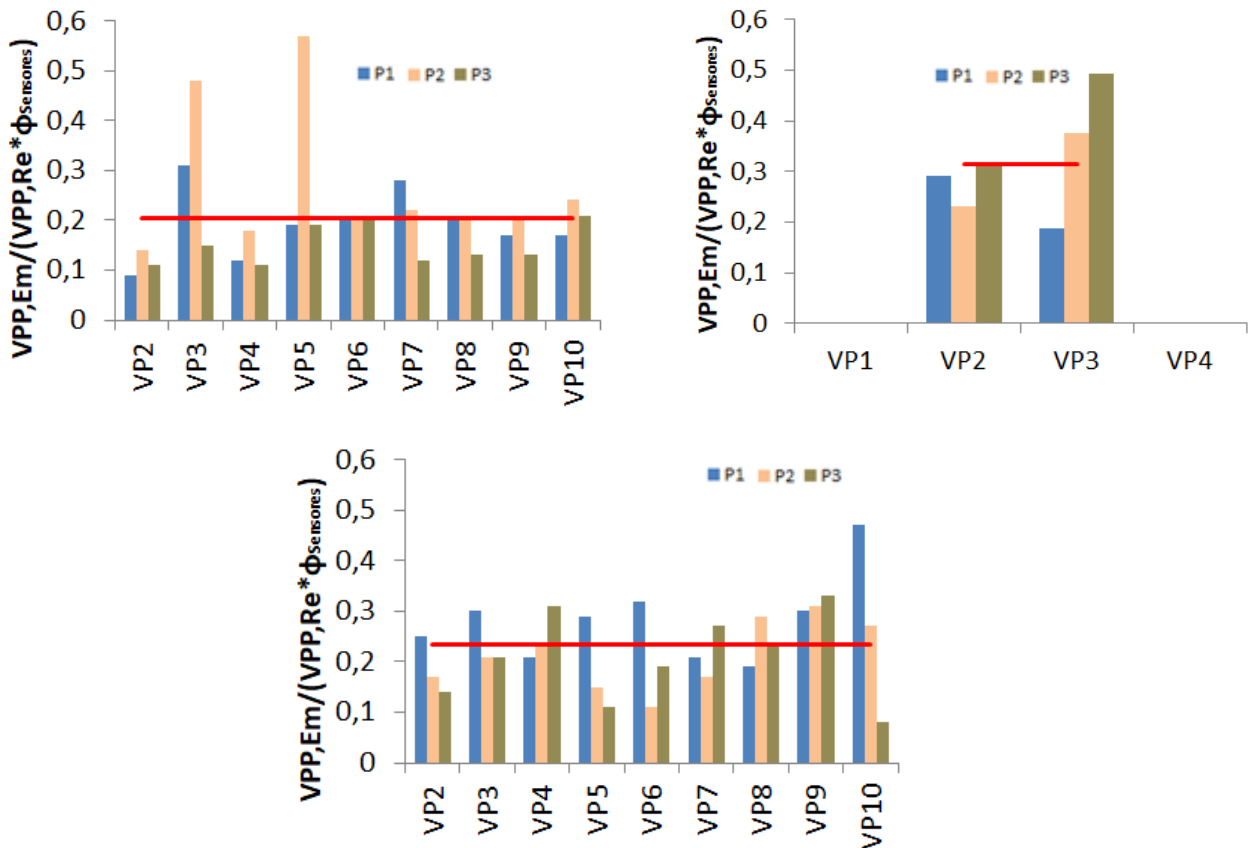


Figura 46. Ratio  $V_{pp,em}/V_{pp,re} * D$  sensores. Izq.: HB1. Der.: HB3. Centro: HB5. Línea roja: valor medio de vigas interiores.

## 4.2. ANÁLISIS DEL TECHO DE LA PLANTA 1

En la PL1, se han medido las vigas horizontales manteniendo las mismas consideraciones que en la PL0, destacando que la única que se encuentra semi-encastrada es la VP4 de la HB1.

Las Tablas 6 Y 7 recogen la velocidad de propagación media, la humedad, la densidad, el MoE y el MoE\* de cada una de las vigas. En la Figura 47, se representa la velocidad longitudinal, la densidad y el MoE\* de las habitaciones de PL1.

En cuanto a la velocidad de transmisión se puede observar como las vigas VP1 de cada estancia son las que presentan menor velocidad (4,4 y 4,53 km/s respectivamente), debido a que son las que se encuentran en los extremos y por lo tanto presentan un mayor deterioro debido a los esfuerzos que deben soportar por parte del empuje del muro, por el contrario se aprecia la mayor velocidad en las vigas colindantes a estas, ya que únicamente soportan esfuerzos de tracción. La velocidad en ambas habitaciones fue ligeramente inferior en comparación con las vigas de la planta 0, así como la humedad, siendo un 1% inferior en el caso de la planta 1, esto puede deberse a la diferencia de altura existente entre ambas plantas.

Respecto a la densidad, observamos que las habitaciones de PL1 arrojan bastante similitud con las habitaciones HB1 y HB3 de PL0, lo que puede dar a entender que el núcleo principal de la vivienda contiene rollizos de madera de la misma partida, a diferencia de lo que ocurre con HB5.

Analizando el módulo de elasticidad, hay tres vigas que arrojan un MoE de en torno a 9000 MPa (siendo valores cercanos a la media de 9063 MPa de la planta 0), sin embargo el resto de vigas presentan valores de MoE muy inferiores entre los 6400-8200 MPa. Este bajo módulo elástico puede asociarse a una peor calidad de la madera, así como a un mal encastramiento en la cabeza de las vigas. Al igual que en la PL0, la correlación de humedad presenta la misma tendencia puesto que las habitaciones son colindantes y la inspección se realizó en las mismas condiciones de temperatura y humedad ambiental.



Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.

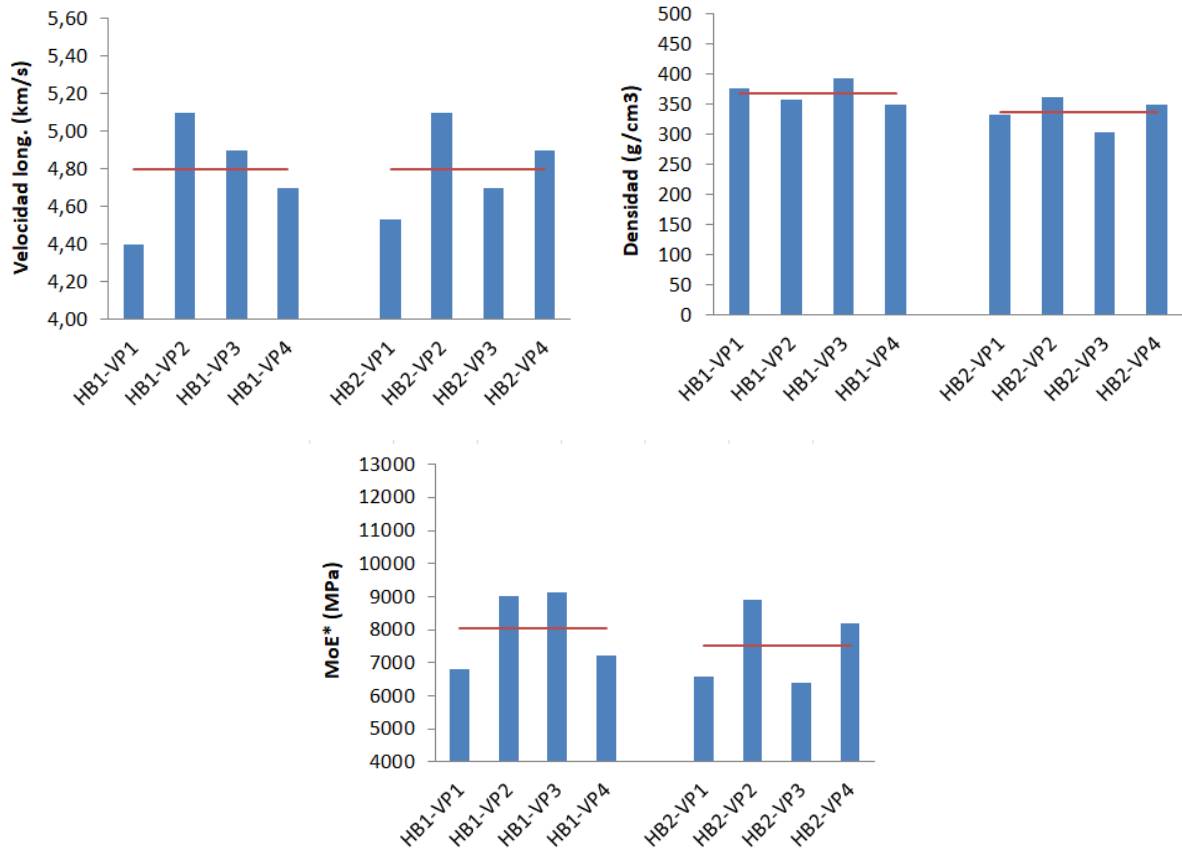


Figura 47. Izq.: Velocidad longitudinal. Der.: Densidad. Centro: MoE\*. Línea roja: valor medio de vigas interiores.

HB1	V (km/s)	$\phi$ medio (mm)	Humedad media (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	MoE (Mpa)	MoE* (MPa)
PL1_HB1_VP1_MEDIO	4,4		8,0	376,6	7076	6793
PL1_HB1_VP2_MEDIO	5,1	119,8	8,0	358,5	9391	9019
PL1_HB1_VP3_MEDIO	4,9	121,5	8,1	392,2	9487	9114
PL1_HB1_VP4_MEDIO	4,7	116,2	8,0	348,4	7543	7238
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,8</b>	<b>119,2</b>	<b>8</b>	<b>368,9</b>	<b>8374</b>	<b>8041</b>

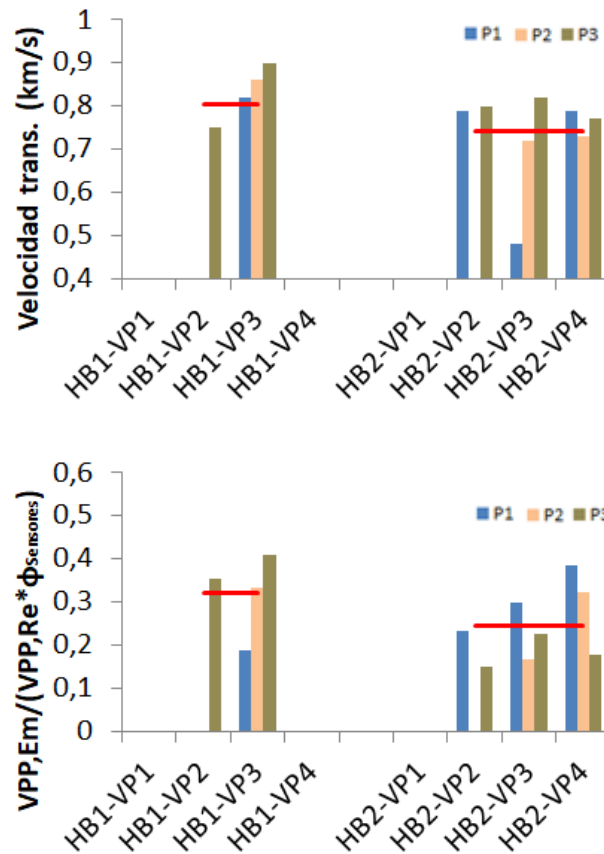
Tabla 7. Resultados de PL1-HB1

HB2	V (km/s)	$\phi$ medio (mm)	Humedad media (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	MoE (Mpa)	MoE* (MPa)
PL1_HB2_VP1_MEDIO	4,5	114,8	8,2	333,8	6834	6574
PL1_HB2_VP2_MEDIO	5,1	121,0	8,0	362,5	9259	8889
PL1_HB2_VP3_MEDIO	4,7	119,2	8,0	303,8	6662	6395
PL1_HB2_VP4_MEDIO	4,9	107,9	8,0	350,0	8545	8207
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,8</b>	<b>115,7</b>	<b>8,07</b>	<b>337,5</b>	<b>7825</b>	<b>7517</b>

Tabla 8. Resultados de PL1-HB2

#### 4.2.1. MEDIDAS TRANSVERSALES

Los valores de velocidad son relativamente homogéneos en todos los puntos, exceptuando el punto 1 de HB2-VP3. Referente al ratio de voltajes pico, todos los valores se encuentran en torno a 0.3, valores similares a los arrojados por las vigas de la planta 0, asociándose a un buen estado de la madera en los puntos medidos.



**Figura 48.** Arriba: Velocidad transversal. Abajo: Ratio  $V_{pp,em}/V_{pp,re} * \phi_{sensores}$ . Línea roja: valor medio de vigas interiores.

#### 4.3. ASIGNACIÓN DE CLASE RESISTENTE

Se realiza una asignación de clase resistente empleando el  $MoE^*$  obtenido en las medidas longitudinales de cada una de las vigas inspeccionadas de la vivienda.

	MoE* (MPa)	Clase resistente
PLO-HB1		
VP2	8868	C16
VP3	9128	C18
VP4	9635	C20
VP5	7326	C14
VP6	8981	C16
VP7	6923	X
VP8	9605	C20
VP9	10459	C22
VP10	8418	C16
PLO-HB3		
VP2	7739	C14
VP3	9463	C18
PLO-HB5		
VP2	8303	C16
VP3	10024	C22
VP4	11896	C27
VP5	10761	C22
VP6	9860	C20
VP7	7076	C14
VP8	10878	C22
VP9	8620	C16
VP10	10542	C22
PL1-HB1		
VP2	9019	C18
VP3	9114	C18
VP4	7238	C14
PL1-HB2		
VP1	6574	X
VP2	8889	C16
VP3	6395	X
VP4	8207	C16

**Tabla 9.** Determinación de la clase resistente de las vigas inspeccionadas.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES PARTICULARES**

Para llegar a las conclusiones generales de este trabajo ha sido necesario primeramente llegar a una serie de conclusiones particulares referentes a los Capítulos desarrollados a lo largo del trabajo y que seguidamente se detallan:

#### **5.1.1. INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA SOBRE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN.**

- 1) Como bien se ha podido comprobar en el análisis obtenido, aquellas vigas que presentaban mayor contenido de humedad, arrojaban valor de MoE más bajos, por tanto la resistencia de la pieza disminuye conforme asciende la humedad.

#### **5.1.2. INFLUENCIA DE LOS DEFECTOS EN LA MADERA SOBRE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN.**

- 1) La presencia de un nudo en la trayectoria de propagación de ultrasonidos supone en general una pérdida de velocidad de propagación, puesto que se produce una discontinuidad en el material.
- 2) La presencia de fendas en la medición transversal implica una pérdida de velocidad de propagación, incluso si esta es de gran dimensión, hace imposible la lectura de tiempo.
- 3) Las acebolladuras, al igual que los nudos producen una bajada de velocidad de propagación.

#### **5.1.3. INFLUENCIA DE LOS DEFECTOS EN LA MADERA SOBRE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN.**

- 1) La pérdida de densidad en la madera provocada por el deterioro de la misma, hace descender los valores de velocidad de propagación de la misma.

- 2) La velocidad longitudinal es ineficaz para detectar el deterioro de la pieza, debido a que esta medida no es demasiado sensible a las variaciones de pérdida de densidad.

#### **5.1.4. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN EN OBRAS DE REHABILITACIÓN CON FORJADOS DE MADERA.**

Considerando las conclusiones anteriores obtenidas en laboratorio, se desarrolla una metodología usando la técnica de ultrasonidos que permite detectar estados de deterioro de la madera en vigas de forjados de madera en obras de rehabilitación.

La metodología aplicada a un caso concreto nos permite obtener las siguientes conclusiones:

- 1) La inspección visual siempre es necesaria, pero resulta insuficiente para determinar la existencia de zonas deterioradas en forjados de vigas de madera. En diferentes casos puede llevar a conclusiones erróneas, y por ello es necesario utilizar técnicas complementarias de inspección, como es el caso del método de ultrasonidos.
- 2) Las medidas de velocidad transversal determinan el estado de deterioro de una viga. La bajada de velocidad de transmisión en dirección transversal de la pieza supone una pérdida de densidad de la misma, lo que implica deterioro de la viga.
- 3) Se puede estudiar la bajada de resistencia en la cabeza de las vigas tomando como valor de referencia la velocidad media de transmisión de ultrasonidos en el tercio central, debido que es en esta zona donde se encuentran las vigas en mejor estado.
- 4) El posible realizar un diagnóstico de las vigas de madera por zonas, distinguiendo la madera con un inicio de estado de pudrición, ya que dos zonas contiguas no deben de presentar cambios importantes en su velocidad. Esto

nos lleva a determinar qué zonas son necesarias reparar, sustituir o ampliar su estudio.

## **5.2. CONCLUSIONES GENERALES**

- 1) La inspección visual es insuficiente para determinar la existencia de zonas deterioradas en forjados madera de obras de rehabilitación, ya que puede llevar a conclusiones erróneas.
- 2) Utilizando el método de ultrasonidos, se establece un diagnóstico del estado de deterioro de las vigas de madera por zonas, distinguiéndose la madera sana, deteriorada o la que tiene inicio de deterioro. Mediante dicho diagnóstico se puede tomar decisiones que afecten al nivel de intervención del proyecto de rehabilitación.
- 3) El método de ultrasonidos nos da la posibilidad de obtener con un grado de confianza suficiente valores que caracterizan la resistencia de los forjados, sin necesidad de utilizar ensayos destructivos.
- 4) Estas conclusiones se llevan a cabo realizando una metodología original en forjados de madera mediante la realización del método de ultrasonidos.

Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.

## CAPÍTULO 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNE-EN 338:2016. Madera estructural. Clases resistentes.
- [2] UNE-EN 384:2016. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- [3] UNE-EN 56.544:2011 Clasificación visual de la madera para uso estructural.
- [4] Casado, M.; Pinazo, O.; Basterra, L.A.; Acuña, L.; (2005). Técnicas de Ensayo No Destructivas en madera estructural mediante extracción de tornillos: aplicación en viguetas de forjado de un edificio singular. Actas del IVº Congreso Nacional de protección de la madera. CIDEMCO (Ed.) Donostia-San Sebastián.
- [5] Pellerin, R.F. y Ross, R.J. (2002). Nondestructive evaluation of wood. Madison, Estados Unidos: Forest Products Society.
- [6] Camacho, J. (2017). Evaluación no destructiva de madera antigua y patrimonial usada estructuralmente. ETS de Ingeniería de Edificación, Universidad Politécnica de Valencia
- [7] Acuña, L., Díez-Barra, M.R. y Casado, M. (2006). Los ultrasonidos y su aplicación a la madera estructural. Aplicación a Pinus pinaster Ait. Huelva. Universidad de Huelva.
- [8] Osuna-Sequera, C., Arriaga, F., Esteban, M., Íñiguez-González, I. (2019). Consideraciones sobre la medición de la velocidad de ondas de ultrasonidos en piezas de madera puesta en obra. Congreso Lignomad 2019, Santiago de Compostela.
- [9] Íñiguez-González, G., Arriaga, F., Osuna-Sequera, C., Esteban, M., Ridley-Ellis, D. (2019). Nondestructive measurements in reclaimed timber from existing structures, 21<sup>st</sup> International Nondestructive Evaluation of Wood Symposium, Freiburg, pp. 462-472.
- [10] UNEP. (2000). Finding alternatives to persistent organic pollutants (POPs) for termite management. UNEP/FAO/Global IPM Facility Expert Group on Termite Biology and Management. Nairobi, Kenia.



- [11] García, I. (2018). In Consumo de chopo por la industria en España: evolución y necesidades futuras, II Simposio del chopo, Valladolid, España.
- [12] Arriaga, F.; Peraza, F.; Esteban, M.; (2002) Intervención en estructuras de madera. AITIM, Madrid.
- [13] Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M., Bobadilla, I., y García, F. (2002). Intervención en estructuras de madera. AITIM, Rivas.
- [14] Rodríguez, C.; Rubio, P. (2000) Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla.
- [15] Villanueva, J.L. (2009). Caracterización mecánica de rollizos de sabina (*Juniperus thurifera* L.) de Castilla y León. Prueba de clasificación visual y evaluación mediante resonancia. Ingeniería de Montes, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria, Universidad de Lleida.

Análisis del estado estructural mediante el método de ultrasonidos de una edificación con vigas de madera de chopo de 100 años de antigüedad.

## **ANEXOS. HOJAS DE CAMPO**