

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO FIN DE GRADO

***CARACTERIZACIÓN MECÁNICA, FÍSICA Y
TÉRMICA DE LA MADERA PINO RADIATA
D DON.***

DOCUMENTO 1 - MEMORIA

Alumno: Rodríguez, Ruiz, Asier

Director (1): Borinaga, Treviño, Roque

Director (2): Cuadrado, Rojo, Jesús

Curso: 2018-2019

Fecha: 18 de Febrero de 2019

RESUMEN

Actualmente, el sector de la construcción está en constante aumento y desarrollo. Cada vez tiene un impacto mayor en nuestro entorno y por extensión un mayor impacto sobre las personas. Este crecimiento requiere que la modernización y la eficiencia del sector se lleven al máximo, para así crecer de una manera sostenible generando el menor impacto ambiental posible.

La madera es un material que está experimentando un aumento en su uso dentro del sector de la construcción, especialmente en España. Este material tiene propiedades óptimas que lo convierten en un material muy acertado para la construcción y a la vez contribuye al medio ambiente.

Este trabajo reúne un estudio de madera de pino Radiata D. Don, cuyo objetivo principal ha sido estudiar si existe o no una diferencia significativa de propiedades de esta madera dependiendo de la posición del tronco en la cual se halle. Al tratarse de la madera más producida en el País Vasco, se plantea conocer y contribuir al uso de este material, y es por ello que se ha realizado este proyecto.

Para ello se ha contado con tres tablonos de madera, del mismo árbol pero que se sabe que no pertenecen a la misma altura del tronco, y de los cuales se han extraído las probetas que han sido ensayadas para conocer sus propiedades físicas, térmicas y mecánicas.

Una vez ensayadas todas las probetas, se han recolectado los datos y se han calculado todas las propiedades. Con los resultados se ha hecho un análisis de comparación de valores entre probetas, tablonos, etc. y se ha llegado a la conclusión de que la resistencia de la madera estudiada sobrepasa con creces la clase resistente C24; también se ha podido observar que su conductividad térmica es bastante mayor en el sentido longitudinal de la madera que en sus direcciones transversal o radial, y su difusividad térmica longitudinal mucho menor que en los otros sentidos. En cuanto a velocidad de ultrasonidos, las ondas tardan menos tiempo en recorrer la madera en su sentido longitudinal antes que los sentidos transversal o radial.

LABURPENA

Gaur egun, eraikuntzaren sektorea handiagotze etengabe eta garapen konstante batean dago. Gure ingurumenean gero eta inpaktu handiagoa eragiten du eta, ondorioz gizakietan ere. Garapen honek, sektorearen berriztatze eta eraginkortasuna behar du, garapen jasangarri bat izateko eta karbono inpaktua horrela murrizteko.

Zura eraikuntzaren sektorean erabilera handiagotzea izaten ari den materiala da, zehazki Espainian. Material honen propietateak itzelak dira eraikuntzarako eta esan denez ingurumenari mesede egiten dio.

Proiektu honek, Radiata D. Don pinuaren ikerketa bat da, bere helburu nagusia enberraren altueraren arabera ea propietateen aldaketa ematen den jakitea da. Euskal Herrian gehien ekoitzen den zura denez, materialari buruz ikastea eta bere erabilera haunditzea bilatzen da, horrek proiektu honen zergatia baita.

Horretarako, laborategiaren hiru oholetatik probetak atera dira saiakuntzak egiteko, zuhaitz berdinekoa zirela jakiten da, baina ez da enborran daukaten altuera ezagutzen. Probetak saiatu dira bere propietate mekaniko, fisiko eta termikoak ezagutzeko.

Probeta guztiak saiaturak eta gero, datu guztiak gorde dira eta analisi bat egin da non balio guztien konparaketa bat egin da. Probetak, oholak, etab. konparatzen ondorio batzuk atera dira. Zura honek eroso gaitzen du C24 klase erresistentea; gainera, konduktivitate termikoa handiagoa da luzetara, zeharkako edo erradial noranzkoekin konparatuz.

Ultrasoinuen abiadurari buruz, uhinak denbora gutxiago irauten dute luzetara noranzkoan mugituz gero, beste noranzkoetan denbora gehiago behar dute.

ABSTRACT

Nowadays, the construction sector it's on a constant growth and development. The impact that it has on the environment it's increasing, so the population. This growth requires the modernisation and efficiency to be pushed to its limits, so it can expand in a sustainable way, generating the smallest possible environmental impact.

Wood it's a raising material on this sector, specially in Spain. The properties it has are optimal for building and at the same time it contributes to reduce the carbón footprint and benefits the environment.

This Project consists of a study of pinus Radiata D. Don. The main objective was to clarify if there's any significant difference in wood properties depending on the longitudinal direction of the trunk's location. This wood happens to be the most produced at the Basque Country, so this study is made willing to know and contribute to the use of this material.

In the beginning, from 3 slabs of the pine wood it's known to belong to the same tree but not to the same height, test pieces were obtained for calculating its physical, thermal and mechanical properties.

Once all the results were obtained, an análisis was made comparing values between test pieces, slabs, etc. So it was concluded that the compression resistance of this material was highly overtaken resistant class C24. Also, it can be seen that thermal conductivity is quite higher on the longitudinal direction of wood than in the cross or radial direction; but thermal diffusion is lower comparing longitudinal direction with cross or radial ones. When it comes to ultrasound velocity through the material, waves take less time to cross through longitudinal direction than other ways.

Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Contexto.....	2
1.2	Objetivos.....	4
1.3	Alcance.....	5
1.4	Beneficios que aporta el trabajo.....	6
2	Estado del arte.....	7
2.1	La madera en la construcción.....	7
2.1.1	La madera a lo largo de la historia.....	7
2.1.2	La madera como elemento estructural.....	11
2.1.3	Uso de la madera en fachadas y tabiquería.....	12
2.2	Normativa y ensayos de caracterización aplicable a la madera objeto de estudio. 15	
2.3	Propiedades de la madera.....	17
3	Metodología.....	21
3.1	Materiales empleados.....	21
3.1.1	Preparación de probetas y planificación de ensayos.....	22
3.1.2	Densidad y humedad.....	23
3.1.3	Conductividad térmica y calor específico.....	23
3.1.4	Velocidad y propagación de ultrasonidos.....	24
3.1.5	Compresión axial.....	25
3.1.6	Compresión perpendicular.....	26
3.2	Ensayos realizados.....	28
3.2.1	Densidad y humedad.....	28
3.2.2	Conductividad térmica y calor específico.....	29
3.2.3	Velocidad de propagación de ultrasonidos, módulo elástico dinámico.....	31
3.2.4	Resistencia a compresión axial.....	34
3.2.5	Resistencia a compresión transversal.....	35
4	Análisis de resultados y discusión.....	37
4.1	Densidad y humedad.....	37
4.1.1	Densidad.....	37
4.1.2	Humedad.....	37
4.1.3	Discusión.....	38
4.2	Conductividad térmica y calor específico.....	39
4.2.1	Longitudinal (TB) y transversal (LR).....	39
4.2.2	Radial 1 (E) y radial 2 (O).....	39
4.2.3	Radial (E+O) y transversal (LR).....	40

4.2.4	Longitudinal (TB) y Transversal (LR) + radial (E+O)	40
4.2.5	Comparación de conductividad térmica en función del plano transversal de las probetas	41
4.2.6	Comparación de conductividad en función de la altura	42
4.2.7	Discusión	43
4.3	Velocidad de propagación de ultrasonidos, módulo elástico dinámico.....	45
4.3.1	Longitudinal y transversal	45
4.3.2	Longitudinal y radial	45
4.3.3	Radial y transversal	46
4.3.4	Comparación entre longitudinal, transversal y radial.....	46
4.3.5	Comparación en función de la altura.....	47
4.3.6	Discusión	47
4.4	Resistencia a compresión axial	49
4.4.1	Comparación por grupos de probetas.....	49
4.4.2	Comparación entre tablones.....	51
4.4.3	Discusión	52
4.5	Resistencia a compresión perpendicular	52
4.5.1	Discusión	53
5	Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos	54
5.1	Reuniones con el tutor	54
5.2	Búsqueda de información previa.....	54
5.3	Introducción y Estado del Arte	54
5.3.1	Reuniones con el tutor para realizar ensayos	54
5.3.2	Búsqueda de normas	54
5.3.3	Preparación de probetas.....	55
5.3.4	Ensayos de Densidad y Humedad	55
5.3.5	Ensayos de Conductividad Térmica y Calor Específico	55
5.3.6	Velocidad de Propagación de Ultrasonidos.....	56
5.3.7	Resistencia a compresión axial.....	56
5.3.8	Resistencia a compresión perpendicular	56
5.3.9	Análisis de resultados y discusión	57
5.3.10	Metodología seguida en el desarrollo del trabajo	57
5.3.11	Aspectos económicos	57
5.3.12	Conclusiones	57
5.3.13	Bibliografía.....	57
5.4	Diagrama de Gantt/cronograma	58
6	Aspectos económicos	59

6.1	Descripción del presupuesto y/o del presupuesto ejecutado.....	59
7	CONCLUSIONES.....	61
8	BIBLIOGRAFÍA.....	63

Índice de tablas

Tabla 1. Ensayo para determinar parámetros a utilizar en ultrasonidos.....	34
Tabla 2. Valores de densidad para probetas prismáticas.....	37
Tabla 3. Valores de densidad para probetas cúbicas.....	37
Tabla 4. Valores de humedad para probetas prismáticas.....	37
Tabla 5. Valores de humedad para probetas cúbicas.....	37
Tabla 6. Comparación de conductividad térmica longitudinal con transversal.....	39
Tabla 7. Comparación de difusividad térmica longitudinal con transversal.....	39
Tabla 8. Comparación de conductividad térmica radial 1 con radial 2.....	40
Tabla 9. Comparación de difusividad térmica radial 1 con radial 2.....	40
Tabla 10. Comparación de conductividad térmica radial con transversal.....	40
Tabla 11. Comparación de difusividad térmica radial con transversal.....	40
Tabla 12. Comparación de conductividad térmica longitudinal con transversal + radial....	41
Tabla 13. Comparación de difusividad térmica longitudinal con transversal + radial.....	41
Tabla 14. Resultados de conductividad en probetas prismáticas.....	43
Tabla 15. Comparación de tiempo de onda entre longitudinal y transversal para probetas cúbicas.....	45
Tabla 16. Comparación de tiempo de onda entre longitudinal y radial para probetas cúbicas.....	45
Tabla 17. Comparación de tiempo de onda entre transversal y radial para probetas cúbicas.....	46
Tabla 18. Resultados tiempo de onda en probetas prismáticas.....	47
Tabla 19. Comparación compresión axial por grupos de probetas (Tablón A).....	49
Tabla 20. Comparación compresión axial por grupos de probetas (Tablón B).....	50
Tabla 21. Comparación compresión axial por grupos de probetas (Tablón C).....	50
Tabla 22. Comparación de compresión axial entre tablones.....	51
Tabla 23 Resultados de resistencia a compresión perpendicular.....	53
Tabla 24. Horas internas.....	59
Tabla 25. Horas externas.....	59
Tabla 26. Amortizaciones.....	59
Tabla 27. Materiales.....	60
Tabla 28. Electricidad.....	60
Tabla 29. Gastos.....	60
Tabla 30. Descargo de gastos.....	60

Índice de gráficos

Gráfico 1. Valores de conductividad térmica en función de la posición de las probetas (tablón A).....	41
Gráfico 2. Valores de conductividad térmica en función de la posición de las probetas (tablón B).....	42
Gráfico 3. Valores de conductividad térmica en función de la posición de las probetas (tablón C).....	42
Gráfico 4. Valores de conductividad térmica en función de la altura.....	43
Gráfico 5. Comparación de tiempo de onda en función de la posición transversal para las 3 direcciones, probetas cúbicas.	46
Gráfico 6. Tiempo de recorrido de la onda en función de su altura en el tronco.	47
Gráfico 7. Comparación de probetas a compresión axial, tablón A.....	49
Gráfico 8. Comparación de probetas a compresión axial, tablón B.....	50
Gráfico 9. Comparación de probetas a compresión axial, tablón C.	51
Gráfico 10. Comparación de resistencia a compresión entre tablonés.	52
Gráfico 11. Valores globales de compresión perpendicular de los tablonés.	53

Índice de figuras

Figura 1. Toneladas de CO ₂ emitidas por ciertos materiales de construcción en función de la función que cumplan [1].	2
Figura 2. Distribución de Pino Radiata en la CAPV.	3
Figura 3. Diferentes usos de la madera a lo largo de la historia: a) Pagoda, China; b) Choza primitiva, Japón; c) Galeón, Inglaterra.	7
Figura 4. a) Estructura de entramado ligero; b) vivienda construida con troncos; c) estructura de CLT; d) proyecto de viviendas de estructura de madera con fachada convencional.	9
Figura 5. a) Escuela construida en CLT (California); b) Residencia universitaria, actualmente edificio de madera más alto del mundo (Canadá); c) centro comercial en San Chinarro, Madrid.	10
Figura 6. a) estado actual de proyecto de viviendas de VISESA; b) construcción proyectada de viviendas de VISESA	10
Figura 7. Elementos del tabique metálico.	13
Figura 8. Elementos del tabique de madera.	14
Figura 9. Probetas obtenidas por cada tablón.	22
Figura 10. Esquema de posiciones para las probetas de compresión axial, ensayo térmico.	24
Figura 11. A la dcha. equipo utilizado para cortar las probetas cúbicas y a la izq. probetas obtenidas de las probetas cúbicas pertenecientes al tablón A.	25
Figura 12. Diferentes tipos de roturas de probetas de compresión axial.	26
Figura 13. Tipos de compresión perpendicular.	26
Figura 14. Medición de la humedad de una probeta.	28
Figura 15. Espiral de níquel con recubrimiento protector de Kapton.	29
Figura 16. Medidas de los valores que el sensor va recogiendo en función del tiempo [17].	30
Figura 17. Colocación de las probetas del material asegurando un buen contacto.	31
Figura 18. Disposición de transmisión directa para los transductores [21].	32
Figura 19. a) Acoplador con probetas colocadas; b) Mecanismo de contrapeso; c) Probeta colocada en acoplador.	33
Figura 20. a) Probeta al comienzo del ensayo de compresión axial; b) Rotura de probeta en el ensayo de compresión axial.	35
Figura 21. Colocación de probetas para compresión perpendicular.	36

Lista de acrónimos

- AEIM: Asociación española del comercio e industria de la madera.
- AITIM: Asociación de investigadores de las industrias de la madera.
- CLT: Cross laminated timber (madera laminada cruzada).
- CTE: Código técnico de la edificación.

1 Introducción.

En este proyecto se ha caracterizado la madera del pino radiata D. don dependiendo de la altura del tronco en la que se encuentre. De esta manera, en primer lugar se han estudiado las propiedades de la madera y la existencia de una variación de las mismas dependiendo de la parte del árbol a la que se corresponda y, así estudiar la posibilidad de dedicar las diferentes partes del tronco para su uso más adecuado.

Este estudio se separa principalmente en tres partes:

Una parte introductoria, donde se encuentran el contexto, objetivos, alcance del trabajo, estado del arte, etc. Esta parte introductoria tiene como misión dar una idea general de cuál es el uso actual de la madera en el ámbito de la construcción, dar a conocer sus propiedades y comportamiento y, en definitiva, hacer una caracterización general del material basada en el conocimiento previo existente. Para ello se ha buscado información en libros, manuales, guías de diseño de construcción en madera, artículos académicos, normativa e información en la web.

A continuación, se describe la parte experimental, en la cual se detalla la metodología llevada a cabo para el cumplimiento de los objetivos planteados. Para ello, se han preparado unas probetas de la madera objeto de estudio y se han realizado ensayos de caracterización física, térmica y mecánica para determinar las diferencias existentes entre diferentes puntos del árbol.

Posteriormente, se interpretan los resultados y se presentan las conclusiones del proyecto y se clasifica el tipo de madera según lo establecido en la normativa que es de aplicación.

Después, se exponen las tareas realizadas, de manera que se da una breve explicación de todo el proceso de realización de este proyecto. Las tareas se exponen en orden cronológico y, además se muestra un diagrama de Gantt en el que se observa de una manera visual todas las tareas realizadas.

Más adelante, se mencionan los aspectos económicos del proyecto. En este apartado se realiza un presupuesto en el cual se indican todos los gastos necesarios para la realización del trabajo.

A continuación, se muestra el apartado de conclusiones, en el cual se muestran los resultados globales a los que nos ha llevado todo el proyecto, y que dan respuesta a los objetivos principales del mismo.

Finalmente, se encuentra la bibliografía donde se referencian todos los autores y fuentes de información de las que se ha hecho uso.

No hay que olvidar que, se adjuntan dos anexos, el anexo de resultados y el anexo de probetas en los cuales se muestra información referente a los resultados de los ensayos y a imágenes de las probetas que no han sido plasmados en este trabajo por su extensión.

1.1 Contexto.

La madera es un material que posee propiedades que otros materiales en el ámbito de la construcción no poseen, los cuales la constituyen como un material muy apto en la construcción.

Según AEIM [1] (Asociación Española de comercio e Industria de la Madera) se trata de un material sostenible y renovable, siempre y cuando la tala se realice de una manera controlada y legal. De hecho, la madera retiene grandes cantidades de CO₂ a lo largo de su vida mientras forma parte del árbol hasta su tala. Por ello, se trata de un material con una huella de carbono negativa a lo largo de su vida útil, es decir, consume más cantidad de CO₂ desde que el árbol es plantado hasta que es talado que el generado al ser utilizada como materia prima para la función que le corresponda y toda su vida posterior.

Para asegurar el buen control y calidad de este material el Reglamento Europeo de la madera prohíbe la entrada de madera y productos de madera procedentes de talas ilegales en toda la Unión Europea. Además, la energía que se consume en su proceso de producción es bastante menor que la energía consumida por otros materiales utilizados en la construcción, tales como el acero, el hormigón, etc. tal y como se representa en la figura 1.

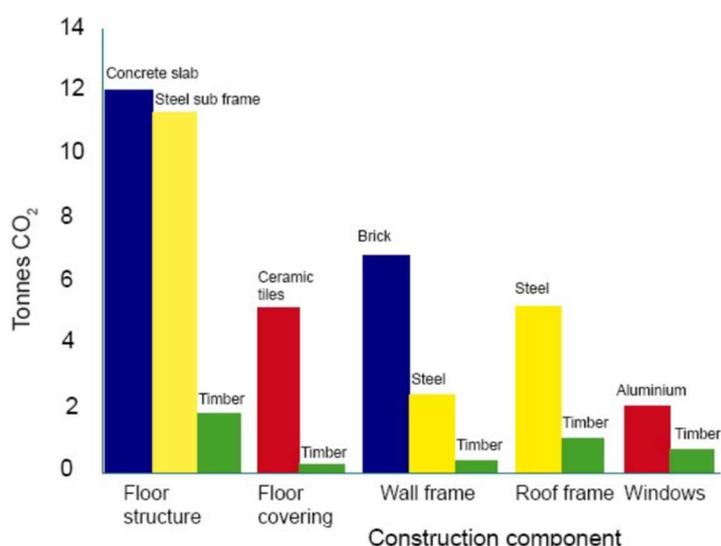


Figura 1. Toneladas de CO₂ emitidas por ciertos materiales de construcción en función de la función que cumplan [1].

Otra de sus características más ventajosas es su ligereza. La madera posee una densidad media de 450 kg/m³ mucho menor que la del acero (7850 kg/m³) o la del hormigón en masa (2500 kg/m³). Por tanto, aporta ligereza a las estructuras, fachadas o componentes que sean construidos en este material, todo ello sin olvidar su componente estético.

Además, la madera posee unas propiedades térmicas óptimas. Su conductividad térmica es menor que la del hormigón, el ladrillo o los morteros. Lo cual dificulta la posible aparición de puentes térmicos en forjados, fachadas, ventanas o cualquier punto sensible a estos. Por tanto, supone un aislante térmico adicional respecto a otros materiales utilizados en cerramientos [2].

Entre los tipos de aislantes térmicos hechos de madera que se utilizan en cerramientos de fachadas se pueden encontrar los de fibra de madera, virutas de madera, corcho natural o cáñamo; todos ellos obtenidos de recursos naturales y renovables [2]. Si bien no son utilizados tan habitualmente como otros aislantes de materiales no renovables, como son la lana de roca o los de poliestireno o poliuretano, su uso está cada vez más extendido.

Según el libro blanco del sector de la madera [3], publicado por la asociación de la madera en Euskadi, la superficie arbolada en el País Vasco abarca alrededor del 54% de su propio

territorio con 396.962 hectáreas, lo cual es uno de los ratios más altos de Europa. Dentro de las especies que pueden ser halladas en el territorio se encuentra el Pino radiata, que supone casi un 50% de todas las especies maderables. La disposición se muestra en la fig. 2.

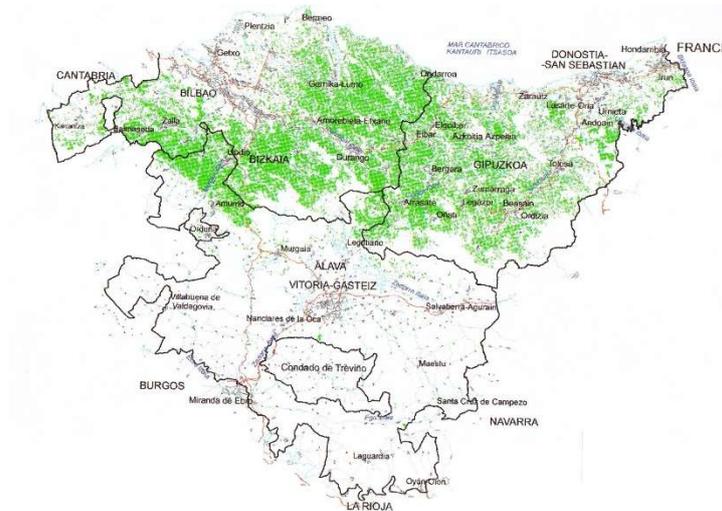


Figura 2. Distribución de Pino Radiata en la CAPV

En la actualidad, el sector vasco de la madera genera más masa forestal de la que se tala, por lo que, en esas condiciones, la madera es un recurso inagotable y sostenible con el medio ambiente cuyo uso debe ser impulsado.

1.2 Objetivos.

En este apartado se presentan los objetivos que se buscan al realizar este proyecto. Estos objetivos han tenido influencia en la dirección tomada para realizar el trabajo. Aunque es cierto que la mayoría se tenían desde el inicio, es cierto que han surgido nuevos objetivos mientras se realizaba el trabajo. Los objetivos de este estudio son los siguientes:

- Caracterizar las propiedades físicas, térmicas y mecánicas de la madera *Pinus Radiata D. Don.*
- Observar si se da una variación de las propiedades de la madera dependiendo de la parte del tronco a la que pertenezca. Pudiendo distinguir así, qué usos son más apropiados para cada parte del tronco.
- Clasificar la madera de acuerdo a los resultados obtenidos según lo establecido en la norma vigente.
- Proponer el tipo de corte a realizar en función del uso al que vaya a ser destinada la madera.

1.3 Alcance.

En este proyecto se realiza un estudio de las propiedades de la madera *Pinus Radiata D. Don*. Donde, de una muestra de la madera se mide mediante ensayos su densidad, humedad, velocidad de transmisión de ultrasonidos, conductividad y difusividad térmica, compresión axial y compresión perpendicular. Los resultados obtenidos sirven para caracterizar el material, sacar conclusiones y aprender a hacer uso de los equipos del laboratorio.

No se trata de una caracterización total de las propiedades de la madera, puesto que hay muchas propiedades que no se han medido. Para una caracterización más precisa de la madera se deberían realizar un mayor número de ensayos con objeto de poder disponer de una mayor cantidad de información: resistencia a flexión, resistencia a tracción axial y a tracción perpendicular, resistencia a factores externos y ambientales, resistencia a incendios, etc. Aunque el presente trabajo ya muestra un número de probetas adecuado para caracterizar el material, en los diferentes ensayos realizados.

Dos factores determinantes son el tiempo y los recursos disponibles. El tiempo es relativamente corto y no se dispone de tiempo suficiente para realizar una gran cantidad de ensayos, ya que los ensayos requieren bastante tiempo. Por otro lado, los recursos del laboratorio son algo limitados, muchos ensayos se deben realizar con equipos muy concretos, los cuales requieren un gran desembolso económico. Algunos de los ensayos no se pueden realizar.

En caso de querer realizar los ensayos de resistencia a la tracción o resistencia a flexión, en primer lugar, se deben realizar más probetas pues se trata de ensayos destructivos. Pero cortar más tablones en probetas supone tener que dedicar menos tiempo en otras partes del proyecto, lo cual no es viable. También se puede hacer un pedido de probetas normalizadas, pero esto supone un desembolso económico mayor, que tampoco es factible.

Si el material del que se sacan las probetas hubiera venido etiquetado determinando a que parte del tronco pertenece los resultados de los ensayos serían mucho más adecuados, pues uno de los objetivos de este proyecto es conocer si existe una variación de propiedades entre diferentes zonas del árbol, de tal manera que el aserrado se pueda realizar de una manera más eficiente destinando las partes del tronco a la función más apropiada. Sin embargo, no ha sido posible y se ha partido de unos tablones procedentes de un mismo árbol y los cuales no se conoce su ubicación exacta dentro del tronco, pero que se puede deducir que no son contiguas debido a las dimensiones y formas de los anillos presentes en las mismas.

Hay que mencionar que la máquina utilizada para realizar los ensayos de compresión aunque permite alcanzar grandes cargas de hasta 30 kN, cuando trabaja a cargas pequeñas inferiores a 1 kN tiene ciertas limitaciones. A la hora de realizar los ensayos existe un límite inferior de unos 3kN, que de no ser superado los resultados que proporciona unos resultados que tienen probabilidad de tener desviaciones. Esto supone una gran desventaja al necesitar realizar ensayos con gran precisión a cargas muy bajas.

1.4 Beneficios que aporta el trabajo.

Tener constancia de una diferencia significativa de las propiedades de la madera dependiendo de su posición en el tronco del árbol es un dato de gran interés para diferentes ámbitos y que puede llegar a tener repercusiones que beneficien a muchas partes a nivel económico, ambiental, de la construcción o incluso a los propios ciudadanos.

En primer lugar, se fomentaría el uso de recursos renovables. Teniendo en cuenta que el País Vasco posee una masa forestal maderable tan amplia, daría pie a que el sector creciese con suficiente fuerza, y que se pueda expandir fácilmente tanto dentro como fuera de la CAPV. De esta manera se generaría empleo local, lo cual es un gran beneficio para los ciudadanos y la economía.

El sector de la construcción saldría beneficiado también. Pues este hecho derivaría en un uso de la madera más eficiente, distinguiendo los usos específicos hacia los cuales sería más recomendable el uso de cada parte del árbol. Al destinarse la madera según su uso más recomendable, ésta desempeñaría una función más eficaz, por tanto la madera sería un material más utilizado en el sector y se reduciría el uso de materiales como el hormigón o el acero.

Al darse este crecimiento en el sector de la madera, se destinaría una mayor inversión a investigación, lo cual supondría una mejora continua del propio sector y de sus productos (sería un sector más eficiente y de mayor calidad, la madera obtendría nuevas cualidades, surgirían nuevos productos que ofrecerían prestaciones cada vez más altas, etc.).

Además, hay que mencionar que se obtendría un gran beneficio ambiental por el hecho de aumentar el uso de la madera. La masa forestal aumentaría también, lo cual representaría un mayor consumo de CO₂ y que se diera una mejora de la calidad del aire. De este modo se reduciría la cantidad de enfermedades asociadas a la contaminación del aire. Por otro lado, supondría un gran ahorro energético tanto en la producción de material de construcción como en el consumo de los edificios al tratarse de un material más aislante y que permite reducir los puentes térmicos en las construcciones, que actualmente se producen en edificios de hormigón. Las edificaciones dispondrían de una mayor eficiencia energética dadas las óptimas propiedades aislantes térmicas y acústicas de la madera.

2 Estado del arte.

En este apartado se trata de contextualizar sobre la influencia de la madera hoy en día, al igual que conocer su marco histórico, usos en el sector científico, propiedades del material, etc.

2.1 La madera en la construcción

La madera ha sido y sigue siendo uno de los materiales fundamentales que ha permitido el desarrollo de la humanidad, desde hace millones de años hasta hoy. Esta materia prima ha permitido realizar edificaciones para protegerse de la intemperie, fabricar herramientas para facilitar tareas y trabajos, crear armas para cazar o protegerse o incluso suponer una fuente de energía para dar calor, cocinar alimentos o alumbrar en la oscuridad, ver figura 3.

a)



b)



c)



Figura 3. Diferentes usos de la madera a lo largo de la historia: a) Pagoda, China; b) Choza primitiva, Japón; c) Galeón, Inglaterra.

Hoy en día supone un material con un gran potencial, sencillo de producir y beneficioso para el medio ambiente. En este apartado se mencionan algunas de las características más importantes.

2.1.1 **La madera a lo largo de la historia**

La madera ha sido utilizada como elemento en la construcción desde el mismo neolítico, mucho antes de que el hombre tuviera herramientas con suficiente capacidad como para trabajar la misma. Al principio, los humanos vivían en chozas o cabañas hechas con ramas de madera, palos y piezas de madera que la naturaleza les brindaba y que podían trabajar con sus propias manos.

Con el paso del tiempo, una vez que se desarrollaron herramientas tales como hachas y cuchillos de piedra que permitían cortar troncos y ramas de mayor grosor se dio una mejora en cuanto a la calidad de las edificaciones. Al disponer de un mejor material, se podían realizar construcciones de mayor tamaño, entidad y solidez.

El primer tratado sobre construcción del que se tiene noticia es del año 25 a.C. aproximadamente, *De Architectura* cuyo autor es Polio Vitrubio [4]. Este documento trata, como su nombre bien indica, sobre arquitectura y técnicas de construcción además de otros temas como la astronomía. En esta obra se recogen las primeras descripciones sobre la composición de la madera, cualidades, usos, etc.

Hay que mencionar que la visión que hoy en día se tiene sobre las ciudades de las civilizaciones antiguas como la griega, romana o la egipcia es un tanto errónea. Cuando se habla de estas civilizaciones lo primero que viene a la mente es la imagen de grandes ciudades con colosales construcciones de piedra, mármol y ladrillo. Sin embargo, dichas ciudades estaban constituidas en su mayoría por viviendas familiares de madera sin tratar, en las cuales los incendios eran bastante frecuentes. A medida que pasó el tiempo y a causa de la combustividad de la madera, las técnicas de construcción fueron cambiando y las ciudades dejaron atrás la madera y comenzaron a utilizar materiales como el adobe, el ladrillo de arcilla cocida o incluso la piedra o el mármol para las familias más pudientes [5].

Hoy en día se puede apreciar que aún existe cierto rechazo hacia el uso de la madera como material de construcción en la zona mediterránea de Europa, lo cual no es más que una herencia del pensamiento de los peligros que conlleva este material al ser usado en edificaciones que se tenía en la antigua Roma. Sin embargo, la percepción de la madera como material de construcción es opuesta en los países escandinavos o en Estados Unidos donde la madera ha sido desde el principio, y sigue siendo, el material más usado en construcción.

Recientemente, gracias a la innovación y a los nuevos avances tecnológicos, existen nuevos tratamientos para la madera que la hacen mucho más resistente al fuego y a los ataques biológicos, lo que la hace mucho más apropiada para la construcción. Gracias a ello, ha recuperado buena fama en Europa y cada vez es más utilizada.

Además de contar con extraordinarias cualidades isotérmicas, es un material renovable y sostenible, con huella de carbono negativo durante su vida útil y un excelente comportamiento frente al fuego gracias a los tratamientos más actuales. En caso de incendio, las columnas no colapsan arrastrando al edificio que sustentan, sino que se endurecen, con lo que se evita el derrumbe.

Si bien es cierto que cada vez se tiende a construir otras tipologías de edificios de madera no tan comunes, como son los bloques de viviendas, edificios gubernamentales, deportivos, educacionales, comerciales o culturales; todavía no es una práctica muy extendida.

Hay que mencionar que, la madera ofrece muchas ventajas frente a otros materiales para cierto tipo de edificaciones. En las piscinas es un material muy utilizado para salvar grandes luces, y se ve mucho menos afectado por la presencia de humedad y cloruros, que el acero o el hormigón. También es un material que se utiliza con mayor frecuencia en cubiertas de centros comerciales por la ligereza que aporta a la estructura y la calidez que aporta el material.

Las viviendas unifamiliares son el tipo de construcción más común que se realiza de madera. Dentro de este tipo podemos encontrar grandes variantes: casas fabricadas con troncos (desde troncos naturales hasta torneados o cepillados), casas de entramado ligero, resueltas con paneles de CLT y viviendas con estructura de madera que por el exterior pueden tener fachadas convencionales (ver fig.4).

Las viviendas de entramado ligero destacan por su rapidez y facilidad de construcción. Se trata de un método tan común de construcción que entre el 60 y el 80% de las viviendas que se construyen en países como Finlandia, Suecia, Austria, Estados Unidos y Australia son de madera, y la gran mayoría de estas son de entramado ligero [5].

En esencia, el sistema de entramado ligero es un método rápido de construcción que se ha ido perfeccionando y tecnificando a lo largo de los años. Se trata de un sistema en el que el edificio está compuesto por la unión de vigas de madera arriostradas entre sí por tableros estructurales, colocados a poca distancia y rellenos de material aislante. De esta manera se diseñan los muros, forjados y cubiertas que; al unirse actúan como una estructura estable y bien arriostrada [6] Se utiliza para edificios de hasta 3 alturas como máximo.

a)



b)



c)



d)



Figura 4. a) Estructura de entramado ligero; b) vivienda construida con troncos; c) estructura de CLT; d) proyecto de viviendas de estructura de madera con fachada convencional.

Otro método que se encuentra en alza ahora es el de madera CLT, siglas de *Cross Laminated Timber* en inglés, también conocida como madera laminada cruzada. Este método de construcción en madera consiste en encolar paneles de madera orientados de forma perpendicular a los adyacentes. De esta manera se consigue que el panel de madera resista una carga estructural mayor en ambas direcciones. Aunque se comenzó a utilizar en Alemania y Austria en 1990, su uso no se llegó a expandir a toda Europa hasta el año 2000.

Los paneles de CLT son cada vez más populares no sólo para edificios residenciales, sino también para edificios de oficinas, comercios e industria [7]; en países como Alemania, Austria, Italia, los países nórdicos o incluso en el País Vasco, donde se sitúa la fábrica de paneles de CLT más grande de España, concretamente en Ea, ver figura 5.

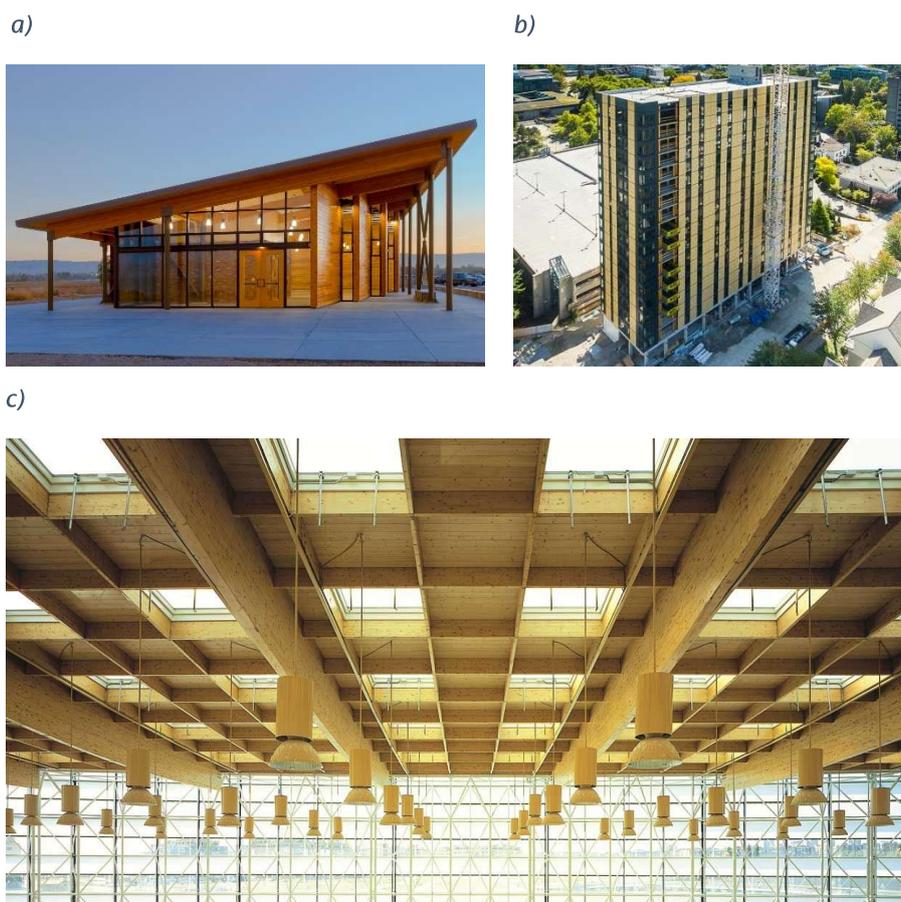


Figura 5. a) Escuela construida en CLT (California); b) Residencia universitaria, actualmente edificio de madera más alto del mundo (Canadá); c) centro comercial en San Chinarro, Madrid.

Actualmente, los métodos más utilizados en nuestro entorno son los de CLT para edificaciones de grandes dimensiones y alturas y las de entramado ligero para edificios de 2 o 3 alturas, en estas últimas generalmente el acabado exterior no se suele distinguir del de un edificio tradicional puesto que, están revestidos por fuera. Un buen ejemplo son las viviendas de VISESA en Hondarribia, cuya estructura es de madera pero a simple vista parecen edificaciones tradicionales, véase fig. 6.

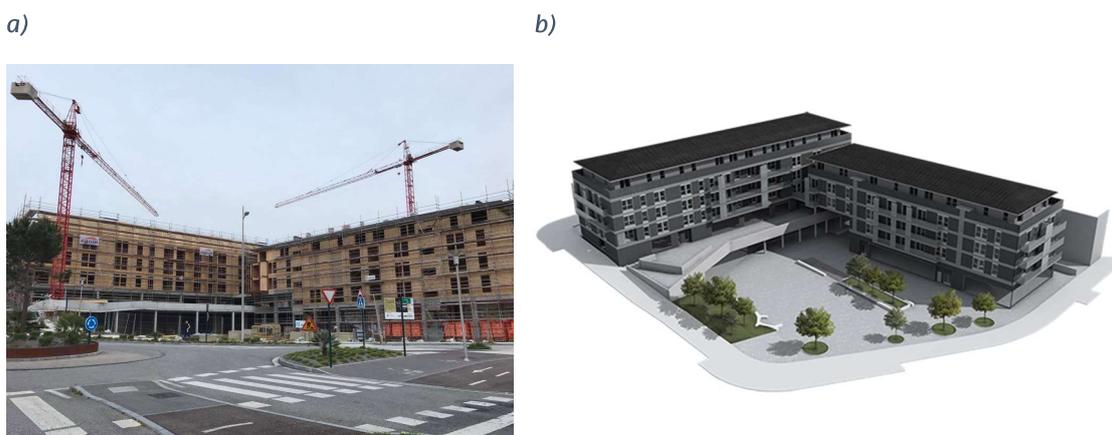


Figura 6. a) estado actual de proyecto de viviendas de VISESA; b) construcción proyectada de viviendas de VISESA

A pesar de su lenta incorporación al mundo de la construcción, cada vez es mayor su presencia. Las posibilidades que ofrece la madera en el mundo de la construcción hoy en día son innumerables.

2.1.2 La madera como elemento estructural

Según AITIM [8] (La Asociación de Investigadores de las Industrias de la Madera) la madera es un material muy apropiado para la construcción, en especial para la estructura de diferentes tipologías de edificios.

Estas son algunas de sus propiedades comparadas con las del acero y el hormigón:

- La madera posee una elevada resistencia a la flexión en relación con su peso propio. La relación resistencia/peso que posee este material es 1,3 veces superior a la del acero y 10 veces superior a la del hormigón.
- Su capacidad de resistir cargas de compresión en dirección paralela a la fibra, es similar a la del hormigón a compresión.
- Posee una escasa capacidad a cortante. Esta limitación también se puede apreciar en el hormigón pero no en el caso del acero.
- Su resistencia a compresión y tracción en dirección perpendicular al sentido de las fibras es bastante baja. Especialmente a tracción, lo cual es una característica muy particular.
- Su módulo de elasticidad es bajo, la mitad que el del hormigón y 20 veces menor que el del acero.
- Su comportamiento ante incendios es mejor que el del acero.

Hoy en día, la seguridad obtenida en el cálculo estructural de construcciones de madera es la misma que la obtenida con otros materiales estructurales. Los criterios de seguridad que se especifican en la normativa de cálculo son los mismos para todos los materiales y por tanto no supone ningún problema para este material en su uso estructural.

La resistencia de este material (f_d) se determina utilizando sus valores característicos (ya sea madera aserrada, laminada, tableros derivados de la madera o de productos compuestos de la madera, etc.) que han sido obtenidos mediante ensayos (f_k), que suelen estar normalizados y, además, suelen ser aportados por el fabricante. Este valor característico se modifica con dos coeficientes, uno que es relativo a la duración de la carga y contenido de humedad del elemento (K_{mod}), y el otro relativo al propio material (γ_M), ver eq. (1).

$$f_d = \frac{K_{mod} \cdot f_k}{\gamma_M} \quad (1)$$

Por otro lado, la tensión de cálculo que debe resistir el elemento (σ_d) se halla a través de las fórmulas habituales de resistencia de materiales, introduciendo el valor más desfavorable (F_d) combinándose los valores de las cargas permanentes ($F_{k,perm}$) y de las cargas variables ($F_{k,var}$) aplicadas sobre las piezas. El valor de la carga se mayor por coeficientes de seguridad (γ_k) que dependen del tipo de carga. Generalmente, los coeficientes de seguridad para las acciones son 1,35 para las cargas permanentes y 1,50 para las cargas variables.

La madera es un material de características elásticas y plásticas, cuando se realiza el cálculo de las deformaciones hay que tener estos factores en cuenta. La deformación total (μ_t) es la suma de una deformación inicial instantánea (μ_i) y una deformación diferida producida por la fluencia. Dicha fluencia se obtiene como una proporción de la deformación inicial en

función del tipo de material, de cuánto dura la carga y de la clase de servicio ($k_{def} \cdot \mu_i$), ver eq. (2).

$$\mu_t = \mu_i \cdot (1 + k_{def}) \quad (2)$$

Dado que la madera y sus productos derivados están formados principalmente por celulosa y lignina, los cuales están compuestos por carbono, hidrógeno y oxígeno; la madera es un material combustible. Sin embargo, la madera maciza no suele arder rápidamente, existen pocos casos en los que el primer material en arder en un incendio haya sido madera maciza.

Si no hay presencia de llama, la madera necesita una temperatura ambiente mayor de 400°C para comenzar a arder. Incluso habiendo presencia de llama se necesita una temperatura superficial de unos 300°C durante un cierto tiempo para que se produzca la ignición. La madera, a pesar de ser un material inflamable a temperaturas bajas comparadas con las que se dan en un incendio, es más seguro de lo que se cree. En primer lugar porque posee una baja conductividad térmica y la temperatura, a medida que va hacia el núcleo, disminuye notablemente. En segundo lugar, la carbonización superficial que se produce crea una barrera que impide la salida de gases de la madera y además impide la penetración del calor a la misma, de esta manera se impide el avance de la combustión. Finalmente, debido a que su dilatación térmica es mínima, no se originan esfuerzos en la estructura ni empujes en los muros.

La madera es un material con gran capacidad de aislamiento térmico lo que supone una importante ventaja en caso de incendio. El coeficiente de conductividad térmica de las coníferas (pino y abetos) en la dirección perpendicular se sitúa aproximadamente entre 0,09 y 0,12 kcal/mh°C (en maderas muy ligeras es de 0,005 y en las más pesadas puede llegar a 0,30). En el caso de los tableros de partículas, dependiendo del espesor, puede variar de 0,08 a 0,15; y en los de fibras de densidad media de 0,06 a 0,72.

La capa carbonizada es 6 veces más aislante que la propia madera. De esta manera el interior de la pieza se mantiene frío, y sus propiedades físicas y mecánicas inalteradas. La pérdida de capacidad portante de la estructura se debe a una reducción de la sección, más que a una pérdida de resistencia del material.

2.1.3 Uso de la madera en fachadas y tabiquería

La madera también puede formar parte de cerramientos o tabiquería, tal y como se muestra a continuación. El uso de este material supone una mejora en cuanto a las propiedades del elemento: un aislamiento térmico y acústico mayor, gran resistencia, ligereza, etc.

Según AITIM [9] (Asociación de Investigadores de las Industrias de la Madera) estos elementos pueden ser clasificados en tabiques y revestimientos:

- **Tabiques:** Estos elementos pueden estar formados por una estructura portante de madera o metal y un revestimiento de madera por las dos caras. Su grosor suele estar en torno a 75 y 80mm. Además, pueden incluir elementos de carpintería como son puertas y ventanas. Requiere elementos auxiliares como esquineros, rodapiés y ocasionalmente elementos aislantes, ver figura 7.

Se distinguen dos tipos:

- *Tabiques modulares de estructura metálica:* Este tipo de tabiques están dotados de una estructura portante de metal y son los más comúnmente utilizados. Están formados por diferentes elementos:

- La durmiente y el rodatecho, que se fijan al forjado, para así arriostrar el tabique a la estructura. Esta unión se produce mediante juntas elásticas como neopreno, espumas, etc.
- Montantes o travesaños que son perfiles metálicos que se ajustan para colocarse vertical y horizontalmente a los perfiles del suelo, respectivamente, y que cumplen la función de riostras absorbiendo desviaciones dimensionales.
- Paneles que recubren la estructura. Suelen ser tableros de madera rechapados o recubiertos con plásticos resistentes a las agresiones, aunque también son comunes los de cartón yeso.
- Elementos auxiliares de carpintería que los sistemas suelen incorporar como puertas, ventanas, etc.
- Barreras fónicas que mejoran el aislamiento acústico y suelen instalarse entre el forjado y el falso techo.

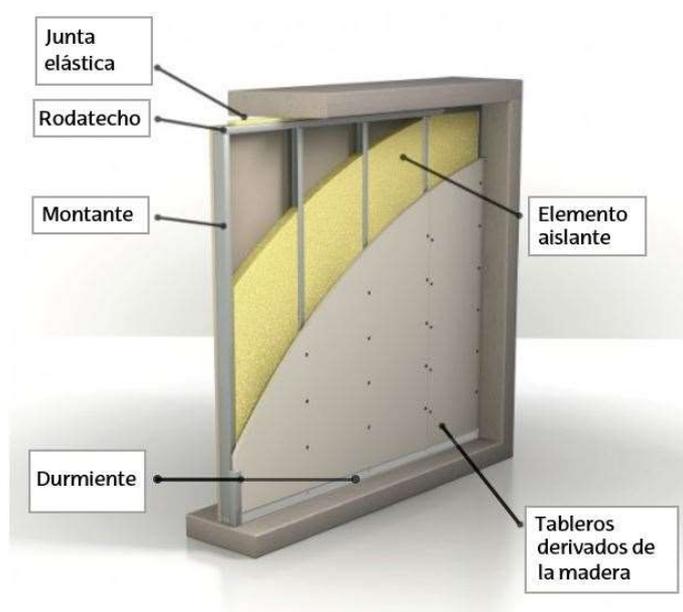


Figura 7. Elementos del tabique metálico.

- *Tabiques modulares de madera:* Este sistema constructivo deriva de los entramados ligeros empleados en las casas de madera (ver figura 8), anteriormente descritos (apartado 2.1.1) y están formadas por los siguientes elementos:
 - Estructura portante formada por montantes de madera normalizada (2x4", 2x6") que son cerradas por dos teseros, superior e inferior, unidos a la estructura a través de durmientes que absorben las irregularidades de la edificación.
 - Tableros derivados de la madera recubiertos, como son tableros de partículas, fibras o contrachapados. Los tableros se pueden fijar al montante con cualquier sistema (adhesivos, molduras, tapajuntas, etc.). Estos tableros pueden recibir un tratamiento que mejore su comportamiento al fuego.
 - Rodapiés que se utilizan como acabado para la junta entre el tabique y el suelo.

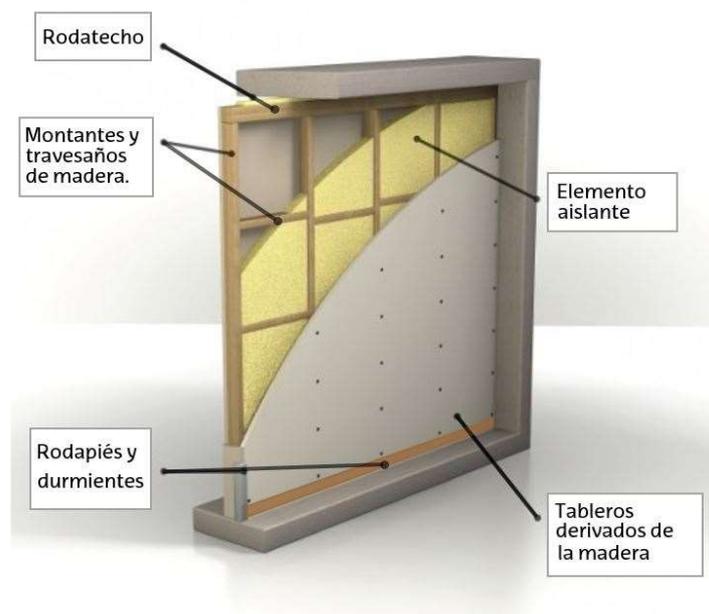


Figura 8. Elementos del tabique de madera.

- Revestimientos o trasdosados de madera: Este tipo de revestimientos se aplican sobre la fábrica, ya sean paredes interiores o exteriores. Los trasdosados de madera presentan discontinuidades en forma de juntas y necesitan de una estructura para ser soportados y poder fijarse a la pared. Están formados por los siguientes elementos:
 - Estructura auxiliar secundaria formada por rastreles transversales a las lamas que dejan una pequeña cámara de aire evitando humedades y condensaciones si es ventilada y ofreciendo la posibilidad de colocar un aislante que mejore las propiedades térmicas y acústicas del lugar. Dichos rastreles pueden ser metálicos o de madera maciza.
 - Revestimientos que, en función de su altura pueden ser clasificados como zócalo (entre 0,8 y 1,50 m) y revestimientos de altura (recubren completamente la pared o dos tercios de la misma como mínimo).
 - Cámara de aire en donde se sitúa el aislante para la mejora de su aislamiento térmico y acústico.

2.2 Normativa y ensayos de caracterización aplicable a la madera objeto de estudio.

Las diferentes normas que afectan a la madera y a todo lo relativo a los ensayos de caracterización de esta son las siguientes:

- **UNE-EN 336:** Madera estructural, medidas y tolerancias.
- **UNE-EN 338:** Madera estructural, clases resistentes.
- **UNE-EN 384:** Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- **UNE-EN 408:** Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- **UNE-EN 844:** Madera aserrada y madera en rollo. Terminología.
 - **Parte 1:** Términos generales comunes a la madera aserrada y a la madera en rollo.
 - **Parte 3:** Términos generales relativos a la madera aserrada.
 - **Parte 4:** Términos relativos al contenido de humedad.
 - **Parte 7:** Términos relativos a la estructura anatómica de la madera.
 - **Parte 9:** Términos relativos a las singularidades de la madera aserrada.
- **UNE-EN 1309-1:** Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las dimensiones.
 - **Parte 1:** Madera aserrada.
- **UNE-EN 1309-1:** Madera aserrada y madera en rollo.
 - **Parte 1:** Método de medida de las singularidades.
- **UNE-EN 1912:** Madera estructural, clases resistentes, asignación de calidades visuales y especies.
- **UNE-EN 13.183-2:** Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada.
 - **Parte 2:** Estimación por el método de la resistencia eléctrica.
- **UNE-EN 13.353:** Tableros de madera maciza (SWP). Requisitos.
- **UNE-EN 14.081:** Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia.
 - **Parte 1:** Requisitos generales.
 - **Parte 2:** Clasificación mecánica. Requisitos complementarios para el ensayo inicial de tipo.
- **UNE-EN 14.358:2006:** Estructuras de madera. Determinación y verificación de los valores característicos.
- **UNE-EN 22007:2016:** Plásticos. Determinación de la conductividad térmica y la difusividad térmica.
 - **Parte 2:** Método de la fuente de calor plana transitoria (disco caliente).
- **UNE 56.542:** Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular a las fibras.

- **UNE 56.544:** Clasificación visual madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

2.3 ***Propiedades de la madera***

Para este apartado se han utilizado distintas fuentes: El Timber Construction Manual [10], La información proporcionada por AITIM [11] (Asociación de Investigadores de las Industrias de la Madera) y el Consejo Finlandés de la madera [12]

La unidad más básica que conforma la madera es la célula, que es la estructura más pequeña en el árbol. Estas células varían dependiendo de sus funciones dentro del árbol; resistencia, conducción y almacenamiento. Su forma es alargada, por ello son conocidas como fibras y están orientadas casi en su totalidad en la dirección longitudinal del tronco. Sin embargo, no todos los árboles tienen la misma organización de células ni los mismos tipos de células, es por lo que existen ciertas variaciones en las propiedades de unos tipos de madera a otros. Además, la madera es un material bastante irregular, en el tronco del árbol se pueden distinguir diferentes partes como son la corteza, los anillos de crecimiento, discontinuidades, etc. que hacen que las propiedades de la madera (físicas, térmicas y mecánicas) puedan variar de una pieza de madera a otra, aunque éstas sean del mismo tipo de madera, o incluso del mismo árbol.

Sin embargo, y a pesar de todo esto se pueden caracterizar las propiedades de la madera de una manera general dando unos valores aproximados de resistencia mecánica, densidad, etc. puesto que los valores reales de cualquier pieza no se alejarán mucho de los genéricos.

El Timber Construction Manual también explica detalladamente las propiedades generales de la madera, a continuación mencionadas.

2.3.1.1 ***Densidad***

La densidad de la propia pared de la célula, considerándola puramente regular y continua, es de aproximadamente 1,5 g/cm³ para todas las especies de madera. Sin embargo, el grosor de la pared de estas células y el tamaño de su cavidad varía de una especie a otra, o incluso dentro de la misma especie en diferentes ejemplares. Es más, las células de la madera temprana poseen generalmente cavidades más gruesas que las células que hay en la madera tardía. La proporción pared cavidad que posean las células de la madera determinará la densidad de dicha madera una vez desecada en el horno para ser comercializada. Dicha densidad podrá ir desde 0,1 g/cm³ de la madera de balsa, que posee un 90% de cavidades en su estructura, hasta 1,3 g/cm³ de la madera Lignum Vitae, cuyo porcentaje de cavidades es del 10%.

La densidad media de la madera una vez desecada en horno es aproximadamente de unos 0,45 g/cm³. Cabe indicar que la densidad de la madera tiene una considerable influencia en su capacidad portante.

2.3.1.2 ***Humedad***

El árbol contiene agua tanto en las paredes de las células como en sus cavidades. La humedad de la madera al natural puede llegar a suponer el 70% de la masa del árbol. El símbolo que se utiliza para representar la humedad es la letra ***u*** (3):

$$u = \left(\frac{m_u - m_o}{m_o} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde, ***m_u*** es la masa húmeda y ***m_o*** es la masa desecada en estufa de la madera (paredes y cavidades de las células sin agua).

La madera se clasifica en función de la humedad media ***u_m*** y la sección de área:

- Madera verde:
 - Si, para una sección de área menor a 200 cm², u_m es mayor al 30%
 - Si, para una sección de área mayor a 200 cm², u_m es mayor al 35%
- Madera semiseca:
 - Para una sección de área ≤ 200 cm²
 $20\% < u_m \leq 30\%$
 - Para una sección de área > 200 cm²
 $20\% < u_m < 35\%$
- Madera seca:
 - $u_m \leq 20\%$

Independientemente de su uso la madera es un material higroscópico, es decir, absorbe agua o la libera dependiendo de la humedad que haya en el ambiente. Dependiendo del uso que se le dé a la madera y cómo esté dispuesta en una estructura dispondrá de una determinada cantidad de humedad. Para cualquier tipo de madera se dan los siguientes valores aproximados:

- Estructuras con calefacción cerradas por todas sus partes: $u_m = 9 \pm 3\%$
- Estructuras sin calefacción cerradas por todas sus partes: $u_m = 12 \pm 3\%$
- Estructuras de cubierta abiertas por todas sus partes: $u_m = 15 \pm 3\%$
- Construcciones expuestas al clima: $u_m = 18 \pm 3\%$

En el interior del edificio, la capacidad de la madera de absorber y liberar humedad puede tener una influencia favorable en la temperatura. Sin embargo, en la fase de diseño y de construcción se debe tener especial cuidado con este aspecto. La absorción y liberación de humedad de la madera hace que esta se hinche y se contraiga respectivamente. Lo que puede dar lugar a la aparición de tensiones térmicas relacionadas a dichas contracciones y retracciones. Por ello, en cualquier construcción en la que se use madera se espera que el contenido de humedad varíe, debido a las inclemencias del tiempo, por lo que se deben prever los cambios dimensionales asociados. Esto se aplica, por ejemplo, a las vigas y pilares de madera expuestos en fachadas, que se exponen a los efectos del sol y de la lluvia. Los cambios bruscos en la humedad de la madera hacen correr el riesgo de agrietar el material.

La capacidad portante de la madera disminuye a medida que la humedad de ésta aumenta y el riesgo de ser dañada por hongos e insectos aumenta de igual manera. Por ello, la madera debe ser desecada hasta llegar a un punto óptimo de humedad en el cual pueda ser procesada y utilizada más tarde. Esto se puede conseguir parcialmente de una manera natural, dejando secar la madera al aire, sin embargo, si se desea conseguir un bajo contenido en humedad en un tiempo reducido se necesita una planta de secado, lo cual requiere energía.

En cualquier construcción en la que se use madera se espera que el contenido de humedad varíe, debido a las inclemencias del tiempo, por lo que se deben prever los cambios dimensionales asociados. Esto se aplica, por ejemplo, a las vigas y pilares de madera expuestos en fachadas, que se exponen a los efectos del sol y de la lluvia. Los cambios bruscos en la humedad de la madera hacen correr el riesgo de agrietar el material.

Por todas estas razones, la humedad es un aspecto con gran influencia y que hay que tenerla muy en cuenta a la hora de trabajar con la madera.

2.3.1.3 Resistencia a tracción, a flexión y a compresión

La madera consiste en millones de células colocadas de manera longitudinal al tronco. De una manera simple el material se podría considerar una estructura formada por un conjunto de tubos orientados de la misma manera y juntos entre sí. Es por esta razón que la madera posee diferentes propiedades en sus diferentes direcciones, se trata de un material marcadamente anisótropo.

La resistencia tanto a la tracción como a la compresión se ven afectadas por esta condición de la madera. Por lo tanto, a la hora de definir sus propiedades mecánicas hay que distinguir siempre entre la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra. Las resistencias y módulos de elasticidad en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular. Como ejemplo se muestran las tensiones permisibles para la madera de abeto:

Las tensiones permisibles en la dirección paralela a las células son las siguientes:

- Compresión: hasta 11 N/mm²
- Tracción: hasta 9 N/mm²

Mientras que en la dirección perpendicular a las mismas se dan los siguientes valores:

- Compresión: hasta 2,5 N/mm²
- Tracción: hasta 0,05 N/mm²

En general, la madera como material estructural presenta una muy buena resistencia a cargas externas mientras que su peso es relativamente bajo.

2.3.1.1 Módulo elástico

Debido a su anisotropía, el módulo de elasticidad de la madera en dirección paralela a la fibra adopta valores diferentes según se trate de sollicitaciones de compresión o de tracción. En la práctica se utiliza un único valor del módulo de elasticidad para la dirección paralela a la fibra. Su valor varía entre 7.000 y 12.000 N/mm² dependiendo de la calidad y especie de la madera. En la dirección perpendicular a la fibra se toma, análogamente, un único módulo de elasticidad, cuyo valor es 30 veces inferior al paralelo a la fibra.

2.3.1.2 Conductividad térmica y calor específico

Según el Consejo Finlandés de la madera [12] la madera posee una baja conductividad térmica debido a su estructura porosa. Como se ha mencionado anteriormente, la anisotropía de la madera hace que sus propiedades no sean iguales en todas sus direcciones. En este caso, la conductividad térmica de la madera es mucho mayor en el sentido paralelo al tronco que en el sentido perpendicular.

Además, dado que la madera es un material higroscópico, cuando la humedad penetra en el material tiene una gran influencia en sus propiedades térmicas. Cuanto mayor es el porcentaje de humedad en el material, mayores son su conductividad térmica y calor específico. Esto es debido a que el calor específico del agua es mayor que el de la madera, en torno a los 4186 J/kg°C. Con la conductividad térmica sucede lo mismo, el agua posee un valor de 0,58W/m·K, mientras que el valor de la madera completamente seca es de 0,13W/m·K.

Hay que mencionar que una variación continua de la temperatura reduce la resistencia de la madera. En temperaturas bajo cero existe la posibilidad de que la madera comience a agrietarse al aumentar de volumen el agua que existe en las células. Al igual que ocurre en suelos, rocas, materiales cerámicos u hormigones, dicho fenómeno puede debilitar este material enormemente.

El aumento de volumen en la madera a causa del calor es muy reducido, y aunque es cierto que la expansión en los sentidos radial y tangencial al tronco es mucho mayor que en sentido paralelo, rara vez tiene una notable influencia.

Por otra parte, el calor específico de la madera depende de su densidad, humedad, temperatura y sentido de las fibras. En promedio el calor específico del pino y del abeto, a una temperatura de entre 0 y 100°C es de 2300J/kg°C.

2.3.1.3 Velocidad de transmisión de ultrasonidos

Se basa en hacer atravesar ondas sonoras a través de un material desde un electrodo emisor a un electrodo receptor. De esta manera se obtiene la velocidad de la onda y se puede calcular la velocidad con la que la onda ha atravesado el material. Una vez hallada la velocidad se puede conocer la calidad de la madera, además de estimar muchas propiedades de la misma.

Según Hasegawa et al [13], la velocidad ultrasónica en la madera está influenciada por sus propiedades físicas y mecánicas, su constante elástica, su densidad y su contenido de humedad.

También menciona que, para coníferas, las velocidades en dirección radial y transversal al tronco del árbol no experimentan ningún cambio a la hora de variar su distancia a la médula del tronco. Sin embargo, sí que se aprecia una diferencia en las velocidades longitudinales en la madera en función de la distancia a la médula. En concreto, la velocidad aumenta a medida que se aleja de la médula. De hecho, la única dirección en la que se aprecian variaciones físicas como la longitud de las fibras, el contenido de humedad o densidad es la dirección longitudinal.

Tippner et al [14], realizan un estudio similar en el que llegan a la conclusión de que en coníferas, la velocidad de transmisión de ondas es significativamente distinta dependiendo de la especie en la que se realice la medida. Las velocidades máximas se han hallado siempre en especies de pino mientras que, las velocidades más bajas fueron siempre encontradas en abetos.

Según Sanite [15] (Saneamiento de Estructuras de Madera), la técnica de ultrasonidos está teniendo una amplia aplicación en la madera recientemente, en especial los procedimientos de transmisión o pulso eco. Estos procedimientos consisten en dos transductores, un emisor y un receptor, que una vez acoplados a la madera, miden el tiempo que tarda la onda ultrasónica en llegar de uno a otro.

Esta aplicación reside en la relación que existe entre las propiedades elastomecánicas de la madera, más concretamente en el módulo de elasticidad y en la constante dinámica, que se obtienen a partir de la velocidad de propagación de los ultrasonidos.

3 Metodología.

En este apartado se explica cómo se ha planteado la investigación con suficiente detalle como para que cualquiera pueda reproducir y comprobar el trabajo realizado. En donde se va a explicar qué materiales se han utilizado para realizar el proyecto, y la metodología utilizada para realizar los ensayos.

3.1 Materiales empleados.

Este trabajo está dedicado en su totalidad al estudio de las propiedades de la madera de Pino Radiata D. Don, es decir, que el único material estudiado va a ser la madera de esta especie.

Según el Timber Construction Manual [10], esta madera posee las siguientes cualidades frente a la mecanización:

- Aserrado fácil y sin problemas.
- Secado fácil y rápido, aunque corre un pequeño riesgo de sufrir deformaciones.
- Fácil cepillado y encolado.
- Clavado y atornillado sin ningún tipo de problemas.
- Acabado fácil.

Sus aplicaciones suelen ser principalmente las mencionadas a continuación:

- Muebles de interior.
- Carpintería de huecos y revestimientos, interior y semiexterior (puertas, ventanas, tarima, etc.)
- Chapas decorativas y contrachapados.
- Madera laminada.
- Envases y embalajes.

Podemos encontrar grandes masas forestales de esta especie en California (EEUU), sur de Chile, Sudáfrica, Nueva Zelanda y en la Cornisa Cantábrica.

En cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas, este material tiene en torno a un 12% de humedad una vez secado en estufa u horno y una densidad de unos 0.5 g/cm^3 . Su resistencia a la flexión es de aproximadamente $87,4 \text{ N/mm}^2$ y su resistencia a la compresión de $43,4 \text{ N/mm}^2$.

En España, existe una gran superficie maderable de esta especie de árbol. El área ocupada a nivel estatal supera las 199.000 ha, de las cuales aproximadamente el 70% se encuentran en el País Vasco, lo que supone el 35% de la superficie forestal arbolada de la comunidad y un 50% del total de sus existencias maderables [16]. Esto supone una gran ventaja para la explotación de este material en nuestra comunidad, tanto para su utilización dentro del territorio como para su exportación, todo ello dentro de un sector que está en alza.

Todos los ensayos han sido realizados con tres grandes tablones de madera de, los cuales han sido cortados en probetas. Más adelante se explicará detalladamente la preparación de las probetas.

3.1.1 Preparación de probetas y planificación de ensayos

Como se ha mencionado anteriormente, se dispone de 3 tablones de madera (de 60x5x15cm cada uno) de *Pinus Radiata*, de donde se han extraído las probetas con las que se han realizado todos los ensayos.

De cada tablón, se han obtenido 27 probetas de 15x5x5cm y 18 probetas de 5x5x5cm. Las probetas de 15x5x5cm se han sometido a todos los ensayos no destructivos y finalmente han sido ensayadas a compresión transversal manteniendo su estado original, sin ningún cambio.

Por otro lado, las probetas de 5x5x5cm sí que han cambiado su forma. Después de ser sometidas a todos los ensayos no destructivos, cada probeta ha sido dividida en otras 4 probetas de 5x2x2cm. De esta manera, de las 18 probetas iniciales de las que se partía, ahora se tienen 72 probetas por cada tablón, véase fig. 9.

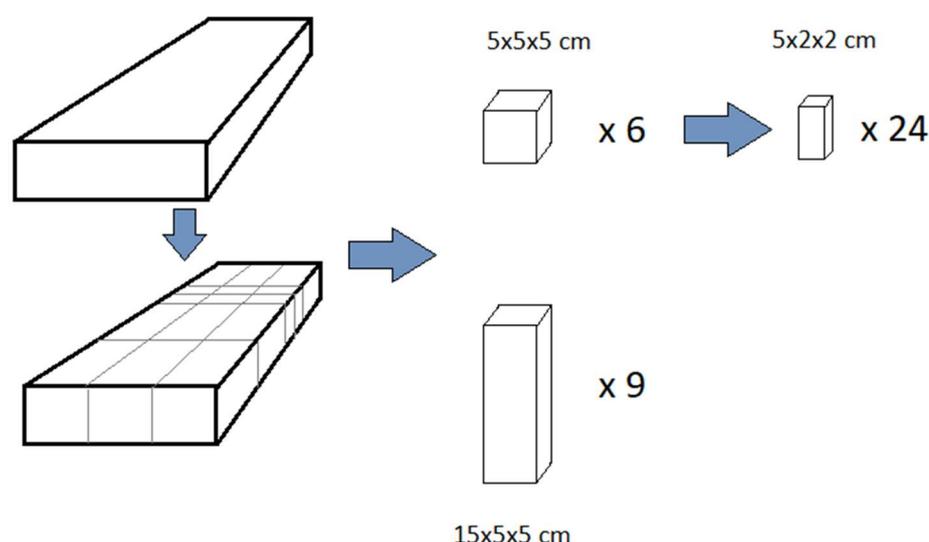


Figura 9. Probetas obtenidas por cada tablón.

Para etiquetar cada probeta se ha utilizado la siguiente nomenclatura. A cada uno de los tablones se le ha proporcionado una letra, teniendo los tablones A, B y C; esta va a ser la primera letra del código de cada probeta. Después, dependiendo del ensayo final al que se ha sometido cada probeta se le ha denominado con la letra T, si era una de las probetas destinadas a compresión perpendicular, y C, si su destino era la compresión axial. A continuación, cada posición de las probetas dentro de la tabla se le ha denominado S (superior) para las que se encuentran en un extremo, I (inferior) para las del extremo opuesto y M (medio) para las que no se encuentran en ningún extremo. Finalmente cada probeta dispone de un número final que va del 1 al 3, para probetas destinadas a compresión perpendicular; o del 1 al 6 para las probetas que han sido destinadas a compresión axial. Este número se otorga a cada probeta en función de su posición en la tabla de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

De esta manera nos queda un código de 3 letras y 1 dígito que sigue el orden seguido en el párrafo anterior, todas las probetas quedan diferenciadas de esta manera.

De ahora en adelante las probetas cuyo destino es el ensayo de compresión axial serán denominadas probetas *cúbicas*, y las probetas destinadas a la compresión perpendicular serán denominadas probetas *prismáticas*.

Además de todo esto, se dispone de cuatro probetas, de dimensiones iguales a las probetas prismáticas y del mismo material, que proceden de tablonos distintos. A la hora de realizar los cálculos no se tendrán en cuenta, pero son válidas para realizar pruebas con los ensayos y ajustar los parámetros de ensayo de la manera más adecuada, antes de realizar los ensayos que sí se tendrán en cuenta para los cálculos. Se dispone de 4 probetas de referencia denominadas: REF1, REF2, REF3 y REF4. Sumando estas probetas a las obtenidas por los tablonos, se dispone de 76 probetas.

A continuación se explica todo el proceso de ensayos que se ha dado y en qué orden se han ido utilizando las probetas.

El propósito ha sido poder utilizar las probetas para todos los ensayos sin tener que recurrir a nuevas probetas; por tanto, en primer lugar se han realizado los ensayos no destructivos sobre las mismas antes de proceder a realizar los destructivos.

Los ensayos no destructivos han sido los siguientes: densidad y humedad, conductividad térmica y calor específico y velocidad de propagación de ultrasonidos.

Los ensayos destructivos por su parte son: Resistencia a compresión axial y resistencia a compresión transversal.

3.1.2 Densidad y humedad

En primer lugar, se han realizado tomadas de mediciones de densidad y humedad, en este ensayo no se ha alterado ninguna característica de las probetas. Simplemente se han hecho unos pequeños orificios a las probetas con los dos punzones del equipo de medición de humedad que al ser tan pequeños no afectan en ningún aspecto a las probetas en sus posteriores ensayos. **En total han sido ensayadas 45 probetas, 27 probetas prismáticas y 18 cúbicas.**

Una vez ensayadas para conocer su humedad, se ha medido la anchura, largura y longitud de cada probeta con un calibre para conocer su volumen y se han pesado en una báscula para obtener su masa. Con estos dos datos se ha obtenido la densidad de todas las probetas.

3.1.3 Conductividad térmica y calor específico

En segundo lugar, se ha realizado el ensayo de conductividad térmica y calor específico, este ensayo tampoco ha alterado las propiedades de las probetas.

Para este ensayo se han utilizado 27 probetas prismáticas y 18 probetas cúbicas.

Con las probetas cúbicas se han tomado 13 medidas por cada grupo de probetas (hay 3 grupos de probetas, cada uno correspondiente a cada tablón). Dada la forma cúbica de las probetas, se ha aprovechado a tomar medidas del valor de conductividad térmica y el de difusividad térmica en las tres direcciones de las mismas: axial, transversal y radial. Se distinguen las siguientes posiciones de medida: TB (Top – Bottom), LR (Left – Right), E (Even) y O (Odd); explicados a continuación en el siguiente esquema, ver figura 10.

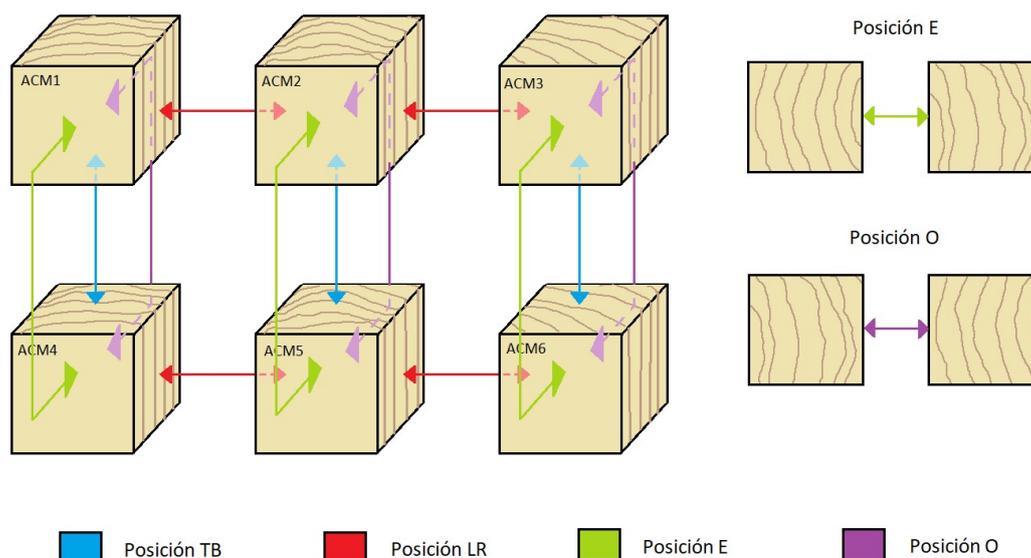


Figura 10. Esquema de posiciones para las probetas de compresión axial, ensayo térmico.

En la Figura 10 se puede apreciar que las posiciones en las que se toman las medidas de las probetas se han realizado para el grupo de probetas del tablón A. Este proceso se ha repetido para los dos grupos restantes de probetas y es así como se han obtenido los resultados, con 160s de tiempo de medida y 200mW de potencia. Después se ha repetido la medición dos veces más para los tres tablones, pero las mediciones siguientes se han realizado cambiando el parámetro de potencia a 225mW y 250mW respectivamente. **De esta manera se han obtenido unos resultados de mayor exactitud, realizando un total de 135 ensayos.**

A continuación, se han tomado los valores de las probetas de compresión axial, se han comparado y se ha discutido sobre los resultados.

Como se demostrará más adelante, en las probetas cúbicas la relación existente entre la conductividad térmica longitudinal y transversales es similar en todos los puntos estudiados. Por ello, en las probetas de compresión perpendicular, se ha realizado el ensayo en una sola dirección, la LR, dado que el objetivo en ese caso es determinar cuál es el cambio de dicha propiedad al variar la altura del árbol.

3.1.4 Velocidad y propagación de ultrasonidos

Después se ha realizado el ensayo de velocidad de propagación de ultrasonidos, este ensayo pertenece al grupo de los no destructivos, lo cual es muy ventajoso puesto que permite ser realizado sin destruir las probetas sometidas al mismo.

En este caso se ha hecho necesario aplicar un gel de ultrasonidos sobre las caras de las probetas en las que se han colocado los transductores para tomar las mediciones, de manera que se asegurase el buen contacto entre la superficie de la madera y la de los electrodos. Esta ha sido la principal razón por la cual se ha dejado este ensayo para el último lugar, ya que las propiedades térmicas del material se verían influenciadas por la presencia del gel empleado.

En primer lugar se ha hecho la medición de las probetas de referencia, estos ensayos se han realizado para distinguir las diferencias entre los resultados variando los parámetros de voltaje y ganancia. Se han hecho ensayos para las 4 probetas con 100V, 200V y 400V para 10x de ganancia y después esos tres mismos valores para 50x de ganancia. En total 24

ensayos. Es así como se ha decidido el voltaje y la ganancia a utilizar para los siguientes ensayos, que ha sido 200V y 50x.

Más tarde, se ha procedido a ensayar las probetas cúbicas, el valor de velocidad se ha tomado en las tres direcciones de la probeta (axial, transversal y radial). Este ensayo se ha repetido para las 18 probetas por lo que se han realizado 54 ensayos.

Después se han ensayado las probetas prismáticas, éstas sin embargo sólo se han ensayado en su dirección axial, realizándose así 27 ensayos.

En total se han realizado 105 ensayos.

3.1.5 Compresión axial

Para este ensayo destructivo se han utilizado las probetas cúbicas, que una vez han sido ensayadas a todos los ensayos no destructivos, han sido cortadas en 4 probetas cada una. Las dimensiones de estas probetas son de 5x2x2cm (figura 11).

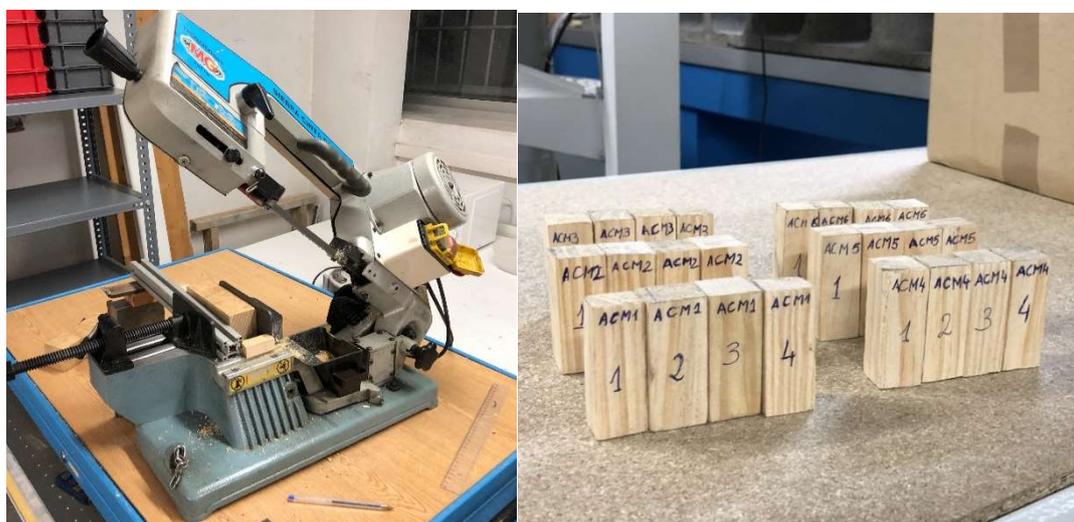


Figura 11. A la dcha. equipo utilizado para cortar las probetas cúbicas y a la izq. probetas obtenidas de las probetas cúbicas pertenecientes al tablón A.

Para la nomenclatura de estas probetas se les ha asignado un número del 1 al 4 a todas las probetas que han salido de una misma probeta cúbica. Se ha tomado el nombre de la probeta primaria y se le ha acompañado del número asignado a cada probeta pequeña. Es decir, de la probeta cúbica ACM1 se han obtenido las probetas ACM1-1, ACM1-2, ACM1-3 y ACM1-4, por ejemplo. Y así sucesivamente con las demás. De esta manera de 18 probetas de las que partíamos se han obtenido 54 probetas.

Estas probetas han sido ensayadas en el equipo de compresión del laboratorio, de una en una. Las probetas quedaban destruidas después de cada ensayo, véase fig.12. Por tanto, **en total se han realizado 54 ensayos.**

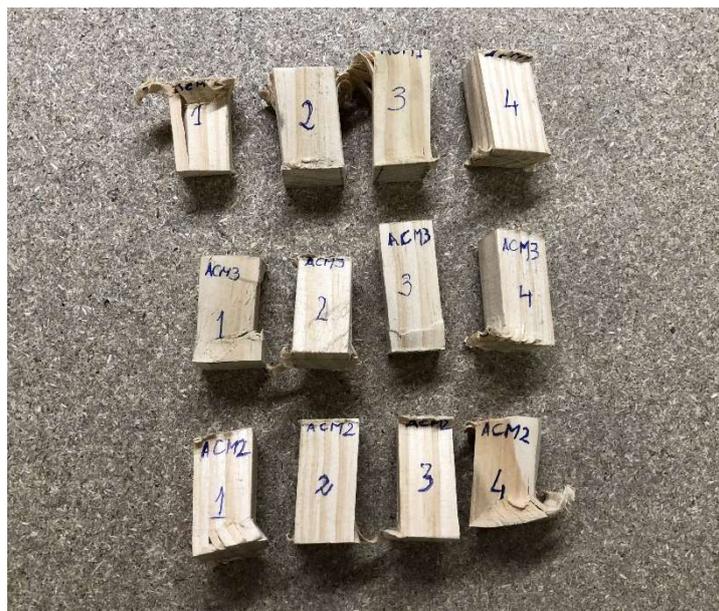


Figura 12. Diferentes tipos de roturas de probetas de compresión axial.

3.1.6 Compresión perpendicular

Finalmente se ha realizado el ensayo de compresión perpendicular, también destructivo. En este ensayo se han utilizado las probetas prismáticas, que no han sido alteradas a diferencia de las cúbicas. Se contaba con 27 probetas, las cuales han sido ensayadas individualmente. Las probetas han sido destruidas después de cada ensayo, por lo **que se han realizado 27 ensayos**.

Hay que puntualizar que, existen dos direcciones perpendiculares a este tipo de probetas: la perpendicular radial, cuya dirección va en el sentido del radio del tronco, y la perpendicular transversal que va en una dirección a 90° de la radial, ver fig. 13.

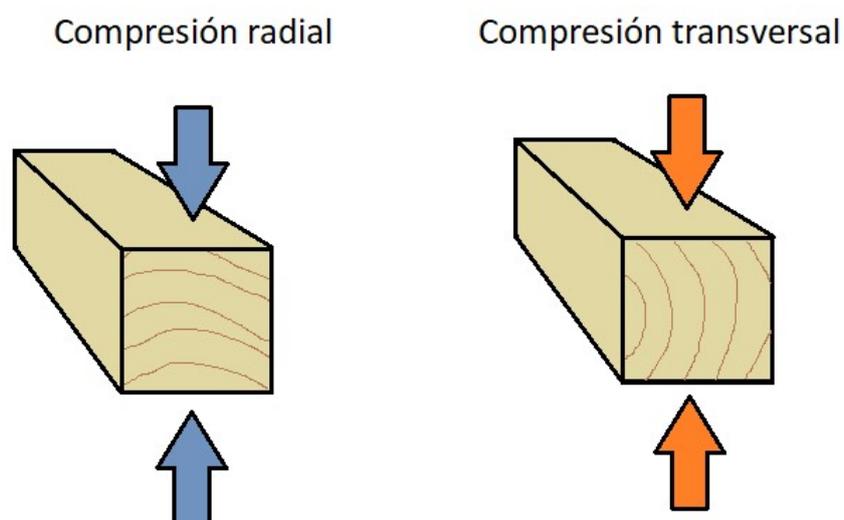


Figura 13. Tipos de compresión perpendicular.

Al tratarse de un ensayo destructivo, no se pueden utilizar las probetas para ambas mediciones por lo que se ha decidido ensayar 6 probetas de cada tablón en la dirección radial y las otras 3 probetas a compresión transversal.

Sin embargo, como la precisión del equipo de compresión es mala a bajos valores de fuerza, varios de los ensayos han sido nulos. Esto ha supuesto que no sea posible la distinción de valores entre probetas ensayadas radialmente y probetas ensayadas transversalmente. Sin embargo se ha podido calcular una media de la resistencia del valor perpendicular en general, obviando el hecho de si los valores están medidos transversalmente o radialmente.

De esta manera han sido ensayadas todas las probetas y se ha dado por finalizada la fase de ensayos.

3.2 *Ensayos realizados*

A continuación se explica la metodología llevada para ensayar la madera. De esta manera se da a conocer el proceso de cada uno de los ensayos realizados, orden en el que han sido realizados y problemas que hayan podido surgir.

3.2.1 Densidad y humedad

Este ensayo se divide en dos partes, el cálculo de la humedad y el cálculo de la densidad en las probetas de las que se dispone.

En primer lugar se ha realizado el cálculo de la humedad siguiendo el procedimiento de la norma UNE-EN 13183-2.

Para ello se ha utilizado un xilohigrómetro eléctrico de resistencia equipado con electrodos aislados. Este equipo debe estar equipado con sistemas de regulación o tablas para realizar las correcciones en función de la especie de madera y la temperatura.

Se ha procedido a medir la humedad con el equipo (fig. 14), no sin antes haber corregido los resultados del xilohigrómetro en función de la temperatura y la especie de madera a medir. El medidor se ha clavado en la dirección de la fibra, tal como indica la norma. Es importante asegurarse que la zona de medición esté exenta de resina, corteza, nudos o bolsas de resina.



Figura 14. Medición de la humedad de una probeta.

En segundo lugar se ha calculado la densidad de la madera. Para ello, en primer lugar se han pesado todas las probetas en una báscula y se han tomado todos sus datos de masa. En segundo lugar se han medido la longitud, anchura y altura de todas las probetas con un calibre. Con estos datos ya se puede calcular la densidad de la madera con la ecuación (4).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Siendo ρ la densidad, m la masa y V el volumen del elemento medido.

3.2.2 Conductividad térmica y calor específico

La conductividad térmica y el calor específico se han determinado mediante el equipo Hot Disk M1. El manual de este dispositivo [17] nos da la explicación del funcionamiento y la teoría de este ensayo. Está basado en la teoría del método de la fuente de calor plana transitoria, recogido en la norma UNE-EN ISO 22007-2 de 2016. Esta teoría ha sido empleada por diversos autores ([18], [19], [20]) para la determinación de las propiedades térmicas de hormigones, aceros, materiales aislantes, madera, etc.

El disco plano que analiza las constantes térmicas utiliza un sensor en forma de doble espiral. Este disco actúa suministrando calor para incrementar la temperatura de la muestra y a la vez hace de termopar para medir el incremento de temperatura a lo largo del tiempo.

Generalmente la espiral del sensor está hecha de Níquel y tiene un grosor de unos 10 μ m. Al tratarse de un elemento tan pequeño, las dimensiones de esta pieza se fabrican con rigurosa exactitud. Dicha espiral está recubierta de algún material para proteger su forma tan particular, para dotarle de mayor fuerza y mantenerla totalmente aislada eléctricamente, véase fig. 15. Este recubrimiento de la espiral puede estar hecho de *Kapton*, una película de poliimida que puede ser utilizada en un rango de temperaturas de entre 10K y 500K. También podemos encontrar recubrimientos hechos de *Mica* cuyo rango de temperaturas puede llegar hasta el límite superior de 1000K. De hecho, se están desarrollando nuevos materiales y técnicas para llegar a temperaturas cada vez más altas.

Para comenzar con el ensayo, el sensor de Níquel se debe colocar entre dos piezas de la misma muestra de manera que hagan un buen contacto entre sí. Así, se asegura que el sensor mida valores lo más cercanos a la realidad. En el caso de líquidos o material en forma de polvo con embeber el sensor en el material, estando completamente sumergido en el material, es suficiente.



Figura 15. Espiral de níquel con recubrimiento protector de Kapton.

El funcionamiento del equipo es sencillo. Mientras se le aplica una corriente constante al sensor para aumentar su temperatura, la temperatura que el mismo sensor recibe aumenta en función del tiempo, ver figura 16.

Una vez introducidos todos los parámetros, comienza el ensayo. El equipo comienza a proporcionar una potencia a la espiral, que toma 200 medidas para el tiempo de medida seleccionado. Y después traduce las medidas en un valor de conductividad térmica y otro de difusividad térmica.

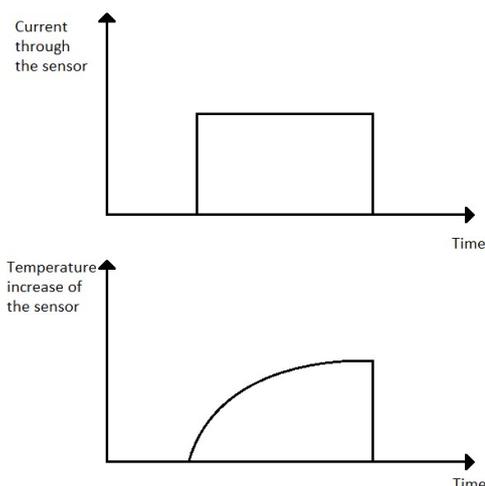


Figura 16. Medidas de los valores que el sensor va recogiendo en función del tiempo [17].

El incremento de temperatura $\Delta T(\tau)$ que depende del tiempo viene dado por la ecuación (5).

$$\Delta T(\tau) = (P_0 / (\pi^{3/2} \cdot a \cdot \lambda)) \cdot D(\tau) \quad (5)$$

Donde a es el radio del disco, λ es la conductividad térmica del material a ensayar y $D(\tau)$ es una función adimensional en función del tiempo que depende de las propiedades resistentes y de la geometría del sensor, además de depender del tiempo adimensional τ , tal y como se muestra en la ecuación (6).

$$\tau = \sqrt{t \cdot \alpha / a^2} \quad (6)$$

Donde t es el tiempo transcurrido desde el comienzo del ensayo y α es la difusividad térmica del material. Por tanto, el incremento de temperatura medio después de un relativo corto período de tiempo sólo depende de P_0 , λ , α y t . Según la teoría de la fuente de calor plana transitoria, el incremento de temperatura es linealmente dependiente de la función $D(\tau)$. De tal manera que, α y λ son obtenidos por vía de un proceso iterativo, forzando a la ecuación (5) para que sea una línea recta.

En nuestro caso, se han colocado dos probetas contiguas de madera y en la misma dirección en la que estarían originalmente situadas en el tronco del árbol. Además, hay que mencionar que las caras de las probetas se suavizaron con una lijadora para hacer que el contacto entre las caras de ambas muestras fuera lo mejor posible, ver fig. 17.

Una vez realizado todo esto, se ha procedido a introducir ciertos parámetros en el programa antes de comenzar el experimento: profundidad de sondeo disponible, tiempo de medida y potencia de calor. Como profundidad de sondeo se ha tomado el valor de 15mm ya que, se trata de la profundidad límite de material de las probetas de 5cm de ancho una vez colocado el sensor centrado. Los otros dos parámetros han sido introducidos utilizando el asistente del programa que, seleccionando el tipo de material que se va a ensayar, introduce un valor preestablecido para su medida. En el caso de madera de pino, el programa introduce 160s de tiempo de medida y 200mW de potencia de calor, sin embargo, se han realizado dos ensayos adicionales variando la potencia a 225 y 250mW para observar que el resultado es estable para un rango de potencias algo más amplio.



Figura 17. Colocación de las probetas del material asegurando un buen contacto.

3.2.3 Velocidad de propagación de ultrasonidos, módulo elástico dinámico.

En este ensayo se ha utilizado el equipo Pundit 200 de Proceq. Para la realización de este ensayo se ha basado en la técnica propuesta por el manual de operación del equipo [21].

Desde la consola se pueden controlar algunos parámetros que influyen el resultado a la hora de la medición, el voltaje y la ganancia.

Al conectarse los transductores a la consola, ésta proporciona energía a los transductores, que generan ciertas ondas sonoras a una frecuencia de 30Hz. Estas ondas pasan a través del material, desde el transductor que las emite hasta el transductor que las recibe. Finalmente, la consola nos devuelve un resultado de tiempo (en μs) que ha tardado la onda en recorrer la longitud existente desde el emisor al receptor, entre otros muchos valores.

El voltaje no hace más que aumentar la potencia de las ondas emitidas, de tal manera que la amplitud de la onda aumenta sin que la longitud de onda varíe. Esto resulta muy útil cuando se desea apreciar la amplitud aumentada. Sin embargo el voltaje se debe procurar mantener en el mínimo posible necesario, dado que un valor muy elevado podría producir efectos no deseados sobre las probetas, como pueden ser generación de calor, vibración del agua de las probetas, migraciones de agua sobre las mismas, etc.

Por otro lado, la ganancia resulta útil cuando la onda se atenúa al llegar al receptor de manera más débil. En este caso aumentando el valor de ganancia se puede ver de manera ampliada la onda. Pero, al igual que sucede con el voltaje, la ganancia también se debe mantener al mínimo posible puesto que darle un valor demasiado alto supondría que otras ondas más tenues en el ambiente pudieran ser detectadas por el transductor generando interferencias y distorsionando el valor real.

Por último, el valor de frecuencia viene dado por los transductores utilizados para la medida, y no se puede cambiar a no ser que se coloquen otro tipo distinto de transductores. En este caso los transductores tienen un valor de frecuencia de 54 kHz. El cual, según el manual, es el valor óptimo para medir sobre madera. Dependiendo del material que se desee ensayar, se hace necesario que el valor de frecuencia sea uno u otro. Para

La disposición de los transductores se ha realizado en modo de transmisión directa, esta es la configuración óptima con la máxima amplitud de la señal y el método más exacto para

determinar la velocidad de pulso. La longitud de recorrido se mide de centro a centro de los transductores, tal y como indica la figura 18.

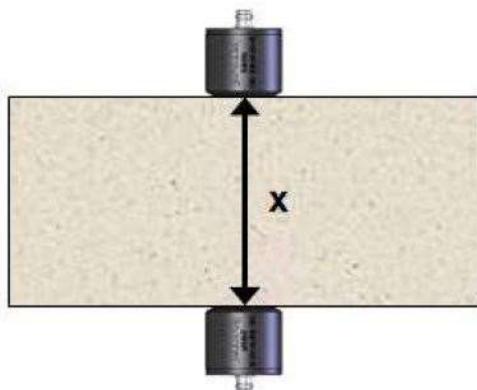


Figura 18. Disposición de transmisión directa para los transductores [21].

En cuanto a la preparación hay tareas básicas que han debido realizarse antes que nada. En primer lugar ha habido que medir la distancia entre los transductores de la manera más precisa posible. Al tratarse de probetas normalizadas, podemos asumir que la distancia entre los transductores será de 15 mm o de 5 mm dependiendo el tipo de probeta que se esté ensayando.

Además, en todos los ensayos de pulso ultrasónico es esencial usar algún tipo de acoplador entre las caras de los transductores y el material ensayado. De no hacerlo, supondrá una pérdida de señal debido a un acoplamiento acústico inadecuado. Por esta razón, se ha construido un soporte a medida para los transductores y las probetas al ser ensayadas. El dispositivo dispone de una parte fija y una móvil. La parte fija sujeta las probetas en su posición con uno de los transductores ya colocado en ella, mientras que la parte móvil, donde se sujeta el otro transductor, se acerca hacia la parte fija movida por el efecto de un contrapeso. La probeta se encuentra en medio de las dos partes, por lo que cuando los transductores entran en contacto con la probeta ejercen una fuerza constante, que sirve para asegurar el buen acoplamiento a la probeta y que el valor de presión se mantiene constante. Como el contrapeso no se ha cambiado, la fuerza de acoplamiento para todos los ensayos ha sido la misma. Se adjunta una imagen del acoplador, ver fig. 19.

Para conseguir un resultado bastante más preciso se hace necesario el uso de un gel o lubricante sobre las superficies donde se vayan a colocar los transductores para la medición. Debido a que la madera posee una superficie algo rugosa, se ha utilizado un gel de base acuosa para realizar las mediciones.

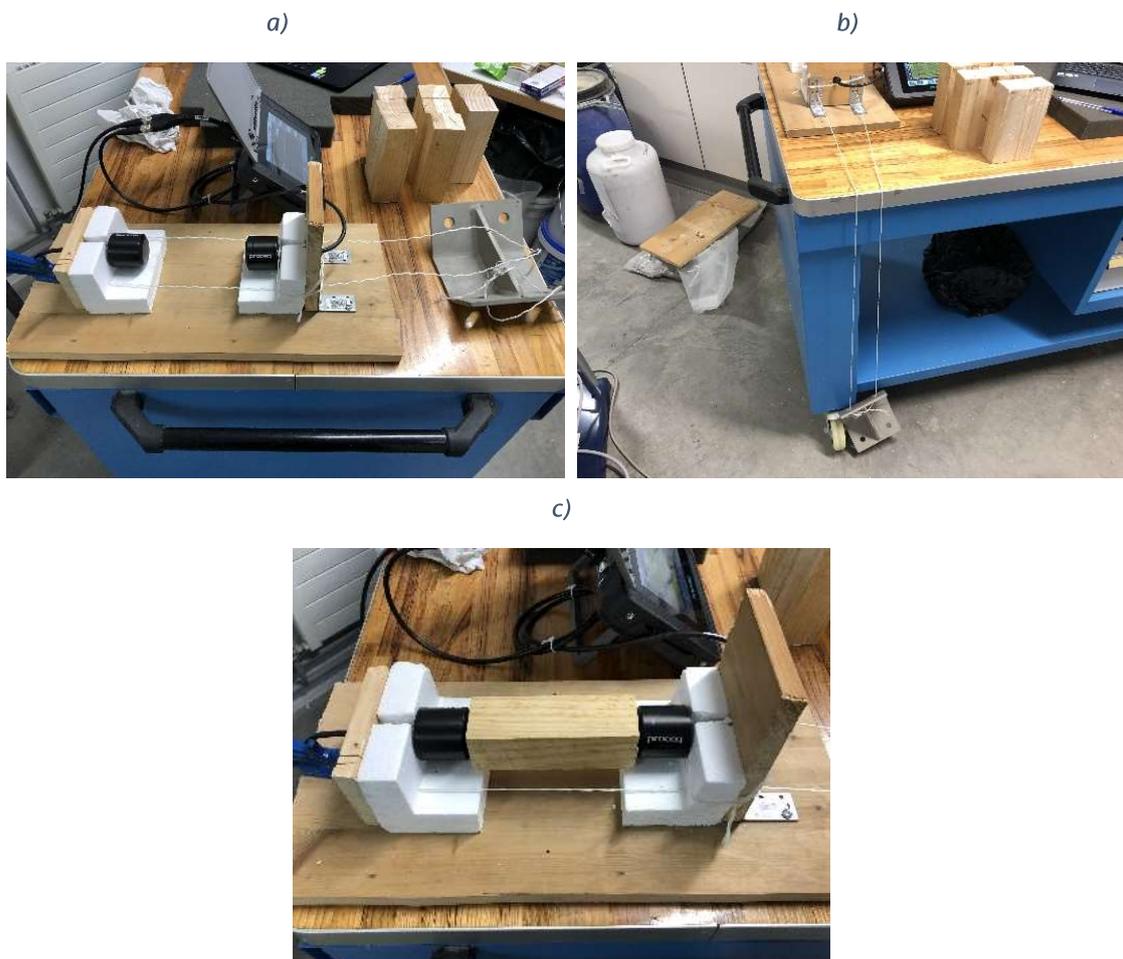


Figura 19. a) Acoplador con probetas colocadas; b) Mecanismo de contrapeso; c) Probeta colocada en acoplador.

Para el voltaje se ha utilizado un valor de 200V, mientras que la ganancia ha sido de 50x; estos valores se han tomado para todos los ensayos.

Estos valores se han elegido por un ensayo previo realizado con las probetas de referencia, en el cual se han ensayado las mismas probetas variando los valores de potencia y de ganancia. Después se han comparado los valores y se han elegido los más apropiados. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Ensayo para determinar parámetros a utilizar en ultrasonidos.

Probeta	Voltaje (V)	Ganancia (x)	Tiempo (μ s)	Diferencia (%)
REF-1	100	10	35,4	Valor de ref.
	200	10	35,2	Valor de ref.
	400	10	34,8	Valor de ref.
	100	50	33,1	Valor de ref.
	200	50	32,4	Valor de ref.
	400	50	32,0	Valor de ref.
REF-2	100	10	46,5	31,36
	200	10	35,7	1,42
	400	10	35,6	2,30
	100	50	34,7	4,83
	200	50	34,0	4,94
	400	50	32,5	1,56
REF-3	100	10	24,7	-30,23
	200	10	24,1	-31,53
	400	10	24,2	-30,46
	100	50	24,1	-27,19
	200	50	24,0	-25,93
	400	50	23,9	-25,31
REF-4	100	10	33,8	-4,52
	200	10	33,2	-5,68
	400	10	31,5	-9,48
	100	50	31,4	-5,14
	200	50	31,0	-4,32
	400	50	30,5	-4,69

Como se puede observar, el valor de voltaje a 100V es algo inestable, en una de las medidas ha dado un valor desorbitado, por lo demás se aprecia que las diferencias por utilizar uno u otro voltaje son muy bajas. Por tanto, se elige el valor de 200V, ya que el de 100V ha quedado descartado y de los dos valores restantes es el menor.

En cuanto a la ganancia se decide tomar 50x, esto es debido a experiencias anteriores en ensayos realizados por el departamento de ingeniería mecánica, que aconseja tomar el valor de ganancia de 50x en vez del valor de 10x.

Una vez colocada la probeta con gel en el acoplador, simplemente se ha puesto en marcha el equipo. Se han introducido los parámetros y se han medido los valores para cada probeta.

3.2.4 Resistencia a compresión axial

Para este ensayo se ha utilizado el equipo universal de ensayo del laboratorio, donde se han realizado ensayos de compresión sobre las probetas. Se ha seguido el método proporcionado por la norma UNE-EN 408:2011.

En primer lugar se indica que hay que asegurarse de que las testas de la probeta sean planas y paralelas entre sí, así como perpendiculares al eje de la probeta. Es por ello que se han lijado previamente para asegurar esta condición.

Además, para asegurarse unos resultados más exactos, se han tomado medidas de la sección de cada probeta con aproximación de 0,1 mm, en vez de suponer que su sección es de 2x2cm.

Después las probetas han sido colocadas de manera concéntrica en la máquina de ensayos, concretamente sobre el plato móvil. Una vez la probeta hace contacto con ambos platos el

dispositivo comienza a aplicar un incremento de carga constante hasta el fallo de la probeta, instante en el cual se detiene el equipo, ver fig. 20.



Figura 20. a) Probeta al comienzo del ensayo de compresión axial; b) Rotura de probeta en el ensayo de compresión axial.

Después se han recogido todos los datos y se ha procedido a hacer el cálculo de la resistencia a compresión de cada probeta, mediante la eq. (7).

$$f_{c,0} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad (7)$$

Donde $f_{c,0}$ es la resistencia a compresión en N/mm^2 , $F_{m\acute{a}x}$ el valor máximo de carga recibido en N y A_0 el área inicial de la probeta en mm^2 .

3.2.5 Resistencia a compresión transversal

Al igual que en el ensayo de compresión axial, se ha utilizado el equipo universal de ensayos para la medición de la compresión perpendicular de las probetas. Todo el procedimiento se ha realizado siguiendo la norma UNE 56.542.

Esta norma indica el método de ensayo para la determinación de la resistencia de la madera a la compresión perpendicular a las fibras, para el cálculo del límite elástico de la madera sometida al esfuerzo de compresión.

Las probetas deben ser en forma de prisma cuadrado de sección recta de 50mm de ancho y una longitud superior al ancho, en donde se aplicará la presión sobre el tramo central de la probeta. Las probetas utilizadas cumplen este requisito puesto que miden 150mm de longitud que ya es un valor mayor que el de la sección de 50x50mm.

El útil de carga también debe tener forma de prisma, una sección recta de 50mm y una longitud superior al ancho. La sección de este prisma es la que aplica la carga a la probeta a ensayar. En este caso, no se disponía de ningún elemento con tales dimensiones por lo que se ha optado en utilizar como útil de carga una barra plana metálica de 50mm de ancho y 40mm de largo (ver fig. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Asimismo, se tendrá en cuenta a la hora de realizar los cálculos el hecho de que la sección sea de 40x50mm. Aunque no es lo que exige la norma, no se ha encontrado una solución mejor.

Después se han medido las dimensiones de la probeta con aproximación de 0,1mm.

A continuación se coloca la probeta sobre el prisma de carga, de manera que esté bien centrada y las fibras estén orientadas perpendicularmente al eje del prisma de carga (ver fig. 21).



Figura 21. Colocación de probetas para compresión perpendicular.

Después, el equipo se ha puesto en marcha de manera que el ensayo dependa del recorrido, es decir, los prismas se acercan hasta entrar en contacto con la probeta, una vez sucede esto, la máquina comienza a comprimir la probeta a razón de 3mm/min hasta llegar a un recorrido de 2,5mm. Cuando la máquina completa el recorrido se para y el valor de fuerza máximo que ofrece es el resultado del ensayo.

4 Análisis de resultados y discusión.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados de tal manera que es posible realizar un análisis de los mismos y su posterior discusión. Los resultados individuales de cada probeta en los ensayos se pueden hallar en el anexo I, resultados.

4.1 Densidad y humedad

4.1.1 Densidad

A continuación, se muestran los valores de densidad para probetas prismáticas (Tabla 2) y para las cúbicas (Tabla 3).

Tabla 2. Valores de densidad para probetas prismáticas.

Tablón	Densidad media (kg/m ³)
A	569,48
B	550,21
C	553,74
Media total	557,81

Tabla 3. Valores de densidad para probetas cúbicas.

Tablón	Densidad media (kg/m ³)
A	560,97
B	565,66
C	553,11
Media total	559,91

4.1.2 Humedad

En primer lugar se muestran los valores de humedad obtenidos para las probetas prismáticas (Tabla 4), y a continuación se muestran los mismos valores para las probetas cúbicas (Tabla 5).

Tabla 4. Valores de humedad para probetas prismáticas

Tablón	Humedad media (%)
A	11,28
B	10,94
C	11,40
Media total	11,21

Tabla 5. Valores de humedad para probetas cúbicas

Tablón	Humedad media (%)
A	11,47
B	11,12
C	11,25
Media total	11,28

4.1.3 Discusión

En los resultados se puede apreciar la inexistencia de una diferencia significativa de valores entre diferentes tablones, tanto para el valor de humedad como para el de densidad. Se observa también, que entre probetas tampoco existe una diferencia significativa de valores, ambos tipos de probetas poseen una densidad y una humedad prácticamente idéntica.

Teniendo en cuenta la clasificación de la madera en función de su humedad (véase apartado 2.3.1.2 Humedad) la madera objeto de estudio puede considerarse madera seca en ambos tipos de probetas por ser menor al 20%. La madera seca, generalmente secada en horno para llegar a dicho valor, suele ser la que mejor cumple con los estándares de la industria de la construcción [10].

Por otro lado, en cuanto al valor medio de densidad total (para madera seca con un grado de humedad en torno al 10-15%), se puede observar que es algo mayor que el valor de densidad citado en otras referencias [8,10,14], que suele ser un valor en torno a los 480kg/m³.

Esto puede deberse en parte al clima del lugar donde se recoge la madera de estudio, en nuestro caso madera de aserraderos locales. Por tanto, se observa que el clima y el emplazamiento tienen cierta influencia en las propiedades de la madera del pino radiata.

4.2 Conductividad térmica y calor específico

En este apartado se muestra la media de las tres mediciones realizadas en las probetas a diferentes potencias (tanto de conductividad térmica como de difusividad térmica) comparándose las cuatro direcciones (longitudinal, transversal, radial "E" y radial "O") entre sí.

Para la comparación, se ha realizado la media de los 3 valores medidos en cada dirección (4 en el caso de TB), se ha calculado la desviación típica y con un intervalo de confianza del 95% se ha hecho la comparación entre diferentes direcciones.

Además, también se ha hecho una comparativa de la conductividad térmica en función de las coordenadas de las mediciones de las probetas para cada tablón, que se muestran más adelante

4.2.1 Longitudinal (TB) y transversal (LR)

En este apartado se hace una comparativa de la conductividad y la difusividad térmica entre las direcciones longitudinal y transversal, denominadas TB y LR respectivamente para realizar los ensayos. Los resultados se muestran de forma resumida en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Comparación de conductividad térmica longitudinal con transversal.

Dirección	Conductividad térmica (W/mK)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Longitudinal (TB)	0,24	0,009	0,006	0,23	0,25
Transversal (LR)	0,20	0,010	0,006	0,19	0,21

Tabla 7. Comparación de difusividad térmica longitudinal con transversal.

Dirección	Difusividad térmica (mm ² /s)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Longitudinal (TB)	0,16	0,012	0,008	0,15	0,16
Transversal (LR)	0,30	0,015	0,008	0,29	0,31

De acuerdo a los resultados se puede observar una diferencia significativa, puesto que los valores de conductividad y difusividad de la posición longitudinal en ningún momento se solapan. La conductividad en sentido longitudinal es un 25% mayor que en transversal, mientras que la difusividad en sentido longitudinal es un 50% menor.

Esto significa que en la dirección longitudinal, el valor de conductividad es significativamente mayor y el valor de difusividad térmica menor que en la dirección transversal. Esto puede deberse a la forma en la que están orientadas las vetas de la madera, que actuarían como una capa extra por la cual le resulta más difícil pasar al calor.

4.2.2 Radial 1 (E) y radial 2 (O)

En este apartado, la comparativa de conductividad y difusividad se realiza nuevamente entre las direcciones radial 1 y radial 2, que se han denominado E y O respectivamente en los ensayos. Los resultados se muestran en las tablas 8 y 9.

Tabla 8. Comparación de conductividad térmica radial 1 con radial 2.

Dirección	Conductividad térmica (W/mK)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Radial 1 (E)	0,21	0,011	0,007	0,21	0,22
Radial 2 (O)	0,22	0,009	0,006	0,21	0,22

Tabla 9. Comparación de difusividad térmica radial 1 con radial 2.

Dirección	Difusividad térmica (mm ² /s)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Radial 1 (E)	0,29	0,027	0,018	0,27	0,31
Radial 2 (O)	0,29	0,060	0,039	0,25	0,32

Para la conductividad térmica los valores de ambas direcciones se solapan completamente, para la difusividad los valores de las dos direcciones casi se solapan. Es por ello, que se puede deducir que la diferencia entre los valores de ambas direcciones no es significativa.

4.2.3 Radial (E+O) y transversal (LR)

En este caso, se comparan la dirección radial, considerándose como la suma de los dos tipos de radiales, y la transversal. Los resultados se muestran en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Comparación de conductividad térmica radial con transversal.

Dirección	Conductividad térmica (W/mK)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Radial (E+O)	0,21	0,010	0,005	0,21	0,22
Transversal (LR)	0,20	0,010	0,006	0,19	0,21

Tabla 11. Comparación de difusividad térmica radial con transversal.

Dirección	Difusividad térmica (mm ² /s)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Radial (E+O)	0,29	0,045	0,021	0,27	0,31
Transversal (LR)	0,30	0,010	0,010	0,29	0,31

En este caso, aunque en un principio parece que en la dirección transversal la conductividad es algo menor, la diferencia no es estadísticamente significativa. Nuevamente vuelven a solaparse los valores de conductividad y difusividad térmica para ambos sentidos.

4.2.4 Longitudinal (TB) y Transversal (LR) + radial (E+O)

Finalmente se hace una comparativa de la dirección longitudinal con el conjunto de las direcciones transversal y radial. Los resultados se muestran en las tablas 12 y 13.

Tabla 12. Comparación de conductividad térmica longitudinal con transversal + radial.

Dirección	Conductividad térmica (W/mK)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Longitudinal (TB)	0,24	0,009	0,010	0,23	0,25
Transv. (LR) + Rad. (E+O)	0,21	0,012	0,004	0,20	0,21

Tabla 13. Comparación de difusividad térmica longitudinal con transversal + radial.

Dirección	Difusividad térmica (mm ² /s)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Longitudinal (TB)	0,16	0,012	0,010	0,15	0,16
Transv. (LR) + Rad. (E+O)	0,29	0,036	0,013	0,28	0,31

En este caso, sí que se aprecia una diferencia significativa, la conductividad es de un 25% mayor en dirección longitudinal que en transversal y radial. Para la difusividad es un 40% menor en sentido longitudinal comparándola con los otros sentidos. Los valores mínimos y máximos de ambos valores no se solapan.

4.2.5 Comparación de conductividad térmica en función del plano transversal de las probetas

A continuación, se muestran los valores de conductividad térmica en el plano transversal de cada medición para las probetas de cada uno de los tablones, también se muestra la veta de cada probeta dado que se considera representativa, ver gráficos 1, 2 y 3.

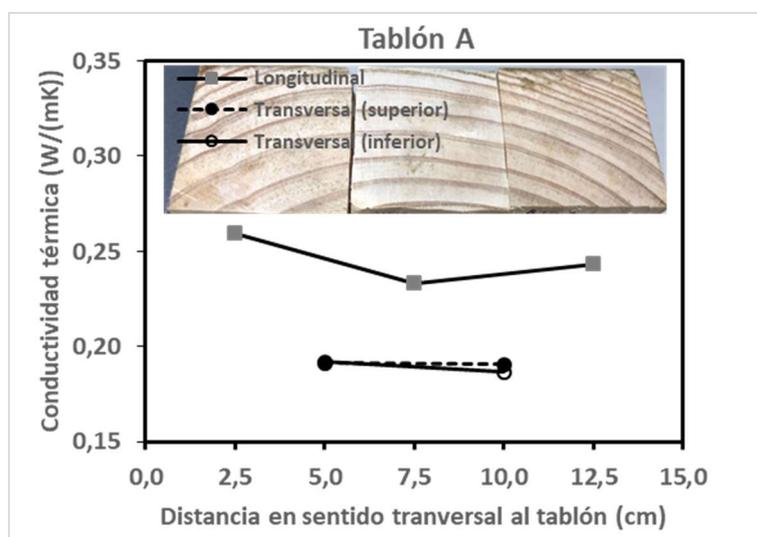


Gráfico 1. Valores de conductividad térmica en función de la posición de las probetas (tablón A).

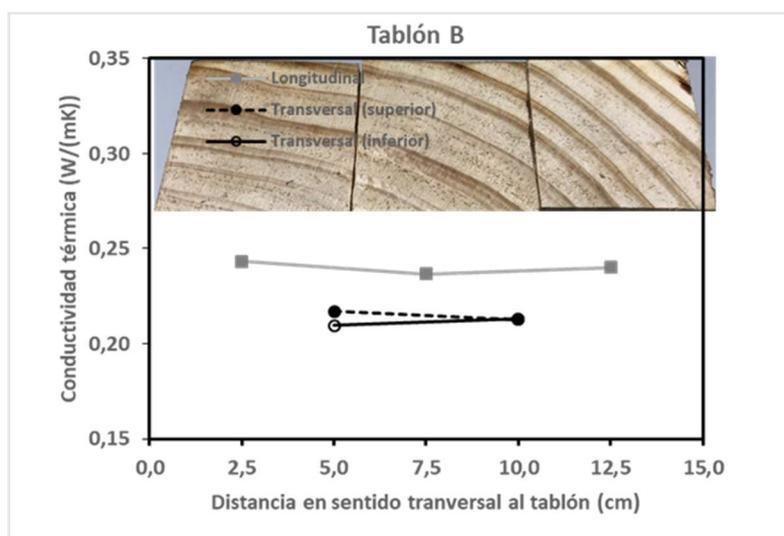


Gráfico 2. Valores de conductividad térmica en función de la posición de las probetas (tablón B).

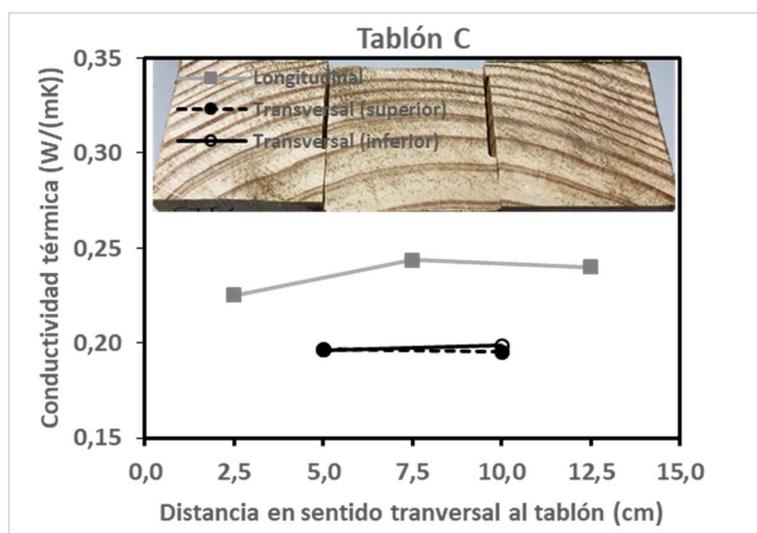


Gráfico 3. Valores de conductividad térmica en función de la posición de las probetas (tablón C).

A simple vista se puede observar que el valor de conductividad térmica en sentido longitudinal es mayor que los demás valores en todas las ocasiones, con una diferencia de alrededor de 0,05W/mK.

Dentro de los propios resultados en sentido longitudinal se observa además, que hay pequeñas variaciones dependiendo de la posición en el plano transversal. Habiendo diferencias de hasta 0,03W/mK.

Por otro lado, se observa que los valores de conductividad en sentido transversal y longitudinal son prácticamente idénticos en todos los tablones, apenas presentan diferencias.

4.2.6 Comparación de conductividad en función de la altura

Después, se han tomado los resultados de las probetas prismáticas, las mediciones sobre estas probetas sólo se han realizado en la posición transversal (LR). Puesto que con los

valores de las probetas cúbicas se ha podido caracterizar la madera sin ningún problema. En este caso, interesa observar si existen diferencias en la dirección de medida transversal en función de la altura a la que se encuentre la probeta, tomando como referencia su tablón inicial. Para los cálculos se ha hecho la media de cada conjunto de mediciones a probetas situadas a una misma altura respecto la tabla a la que pertenecen, se ha calculado la desviación típica y el intervalo de confianza y se han comparado los resultados. Los resultados se muestran en la Tabla 14 y gráfico 4.

Tabla 14. Resultados de conductividad en probetas prismáticas.

Posición	Tiempo (μ s)			Min	Max
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)		
Superior	0,21	0,019	0,015	0,19	0,22
Intermedia	0,21	0,025	0,020	0,19	0,23
Inferior	0,20	0,008	0,006	0,19	0,21

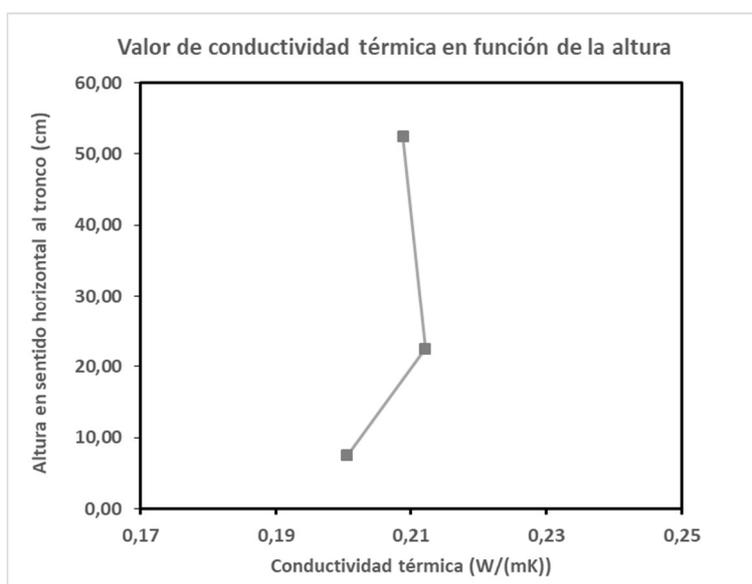


Gráfico 4. Valores de conductividad térmica en función de la altura.

4.2.7 Discusión

De los resultados se puede deducir que, la conductividad térmica en sentido longitudinal es en todos los casos, mayor que en los otros dos sentidos. Esto puede deberse a las vetas de la madera y a la manera en la que las fibras están dispuestas. La conductividad es mayor en el sentido longitudinal puesto que la orientación de las fibras de la madera permite al calor moverse de manera más sencilla, mientras que en los sentidos perpendiculares (radial y transversal) la orientación de las fibras opone cierta dificultad al paso del calor.

Por otro lado, la difusividad térmica ha sido en todos los casos mayor en los sentidos perpendiculares que en el sentido longitudinal. Por lo que se deduce que la velocidad de disipación de calor es mayor por sus sentidos perpendiculares que por su sentido longitudinal.

A la hora de comparar la conductividad térmica entre los diferentes tablones se ha observado que los valores en sentido longitudinal apenas varían entre tablones, se mantienen relativamente constantes, sin embargo hay pequeñas alteraciones que se

atribuyen a la forma de las vetas y la cercanía a la médula del tronco puesto que no son iguales todas ni tienen la misma forma.

Finalmente, en la comparación de la conductividad térmica en función de su altura en el tablón de madera, se aprecia que la diferencia de los valores en sentido longitudinal en función de su posición no es significativa, puesto que todos los intervalos de confianza se solapan. Por tanto se puede deducir que la altura del tronco no influye en el valor de la conductividad térmica en sentido longitudinal.

4.3 Velocidad de propagación de ultrasonidos, módulo elástico dinámico.

En este apartado se muestran todos los resultados obtenidos a partir de los ensayos de velocidad de transmisión de ultrasonidos realizados sobre las probetas. Dado que es un estudio comparativo y se comparan probetas que son iguales, en vez de compararse la velocidad de transmisión se ha optado por comparar los resultados de tiempo que la onda tarda en recorrer la probeta, pues es esta la magnitud que el equipo nos da directamente.

En primer lugar se han ensayado las probetas cúbicas, en sus tres direcciones (longitudinal, transversal y radial) y lo que se ha realizado a continuación ha sido comparar los valores de las direcciones entre sí. Para ello se ha hecho la media de los resultados para cada dirección, se ha calculado la desviación típica y el intervalo de confianza, y después con esos valores se han comparado las distintas direcciones. En los siguientes apartados se muestran las comparativas entre direcciones.

4.3.1 Longitudinal y transversal

En este apartado se comparan la dirección longitudinal con la transversal para los valores de tiempo de transmisión de onda. Véase la Tabla 15.

Tabla 15. Comparación de tiempo de onda entre longitudinal y transversal para probetas cúbicas.

Dirección	Tiempo (μ s)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Longitudinal	11,65	1,398	1,12	10,53	11,93
Transversal	29,88	0,935	0,75	29,13	30,06

Se puede observar que el valor de tiempo en la dirección longitudinal es bastante menor al de la longitud transversal; además, los intervalos de confianza no se solapan, por lo que se puede afirmar que existe una diferencia significativa entre los valores observados en ambas direcciones.

4.3.2 Longitudinal y radial

A continuación, se muestra la comparativa de valores de tiempo de onda entre las direcciones longitudinal y radial. Mostrados en la tabla 16.

Tabla 16. Comparación de tiempo de onda entre longitudinal y radial para probetas cúbicas.

Dirección	Tiempo (μ s)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Longitudinal	11,65	1,398	1,12	10,53	11,93
Radial	26,58	0,941	0,75	25,83	26,77

En estos resultados nuevamente, se aprecia que los valores de tiempo en el sentido longitudinal son bastante menores que los resultados en el sentido radial. Los intervalos de confianza no se solapan por lo que se puede observar que la diferencia es significativa.

4.3.3 Radial y transversal

Finalmente, se muestran los resultados de la comparación entre valores de tiempo que se ha hecho entre los sentidos radial y transversal. Véase la Tabla 17.

Tabla 17. Comparación de tiempo de onda entre transversal y radial para probetas cúbicas.

Dirección	Tiempo (μ s)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Transversal	29,88	0,935	0,75	29,13	30,06
Radial	26,58	0,941	0,75	25,83	26,77

En este caso se observa que la diferencia de resultados entre ambas direcciones es de unos 2,5 μ s. Observando los intervalos de confianza se puede observar que no se solapan, por tanto, la diferencia sí es significativa entre las direcciones transversal y radial.

4.3.4 Comparación entre longitudinal, transversal y radial

A modo visual, y comparando las tres direcciones en las que se han realizado mediciones, el siguiente gráfico muestra los valores obtenidos de tiempo de transmisión de onda en función de la posición de la probeta en el plano transversal, véase gráfico 5.

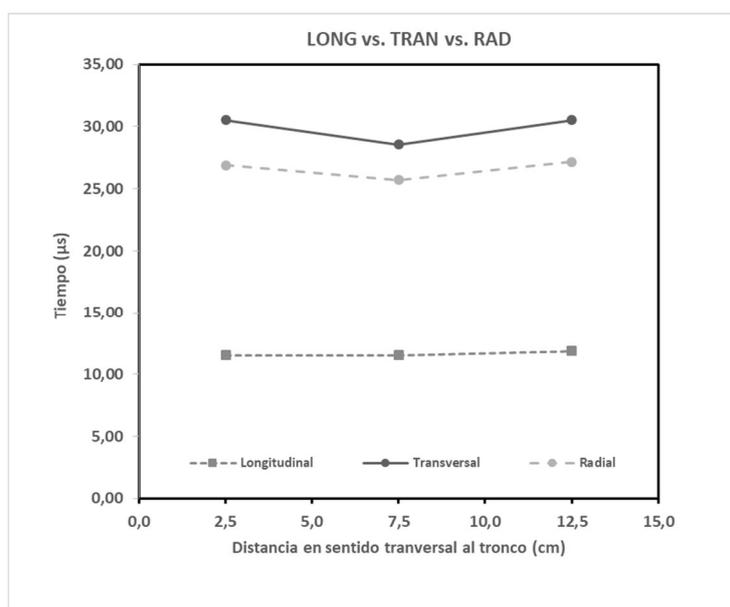


Gráfico 5. Comparación de tiempo de onda en función de la posición transversal para las 3 direcciones, probetas cúbicas.

En primer lugar se puede observar que el tiempo que tarda la onda en recorrer las probetas en el sentido longitudinal es siempre bastante menor que en los otros dos sentidos, del orden de 15 μ s menor, lo que supone más de un 50% del valor radial o el transversal.

Además, se observa que la variación del tiempo en función de su posición dentro del plano transversal es prácticamente nula en la dirección longitudinal, mientras que en las

direcciones radial y transversal varía ligeramente al realizarse la medición de la probeta central.

4.3.5 Comparación en función de la altura

Después, se han tomado los resultados de las probetas prismáticas. Como ya se ha mencionado anteriormente, las mediciones en estas probetas sólo se hicieron para la dirección longitudinal. Puesto que los valores de las probetas cúbicas ya son suficientes para caracterizar la madera en sí. En este caso, se tiene interés en observar si se dan diferencias en la dirección longitudinal en función de la altura a la que se encuentre la probeta, tomando como referencia el tablón inicial de donde salió. Los resultados se muestran en el gráfico 6 y la tabla 18.

Tabla 18. Resultados tiempo de onda en probetas prismáticas.

Posición	Tiempo (μ s)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
Superior	26,6	0,769	0,503	26,10	27,10
Intermedia	27,0	0,929	0,607	26,39	27,61
Inferior	26,4	0,794	0,519	25,88	26,92

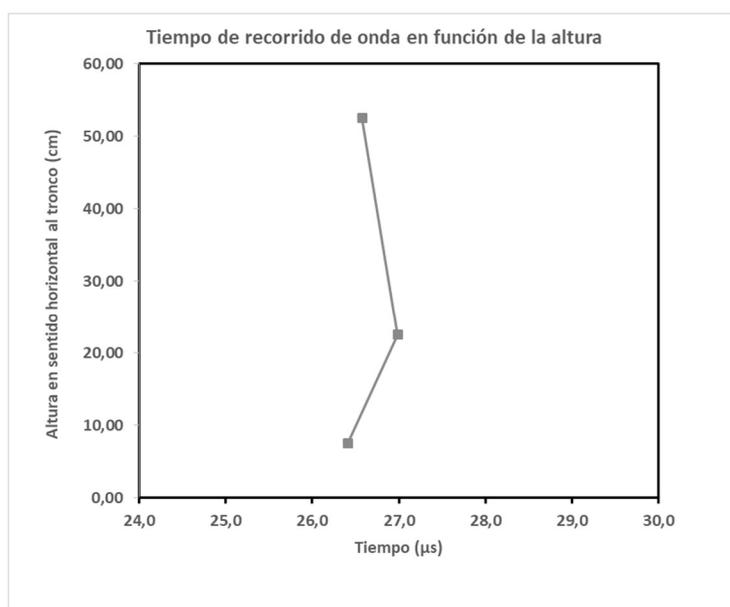


Gráfico 6. Tiempo de recorrido de la onda en función de su altura en el tronco.

4.3.6 Discusión

En todas las comparativas de resultados se puede observar que en el sentido longitudinal, el valor de tiempo de recorrido de la onda de la madera estudiada es siempre constante y no varía en el plano transversal.

Por otro lado, en las direcciones transversal y radial siempre se dan valores más altos, es decir, a la onda le cuesta más tiempo recorrer la misma longitud. En estos dos sentidos se aprecia una pequeña diferencia en la probeta central, el valor es ligeramente más bajo. Aunque no supone una diferencia significativa, es interesante mencionar que esto está

producido por la orientación de las vetas de ciertas probetas que es algo más inclinada que el resto, lo cual hace que la media disminuya ligeramente.

Además los valores del intervalo de confianza no se solapan en ningún caso para cualquiera de las tres direcciones, aunque es cierto que en la dirección longitudinal se observan valores de más del 50% menores que las otras dos direcciones. Por lo cual, se deduce que en el sentido longitudinal existe una diferencia significativa respecto a los otros dos sentidos, y el material de la probeta, en dicho sentido, es más continuo y está distribuido de una manera más homogénea.

En cuanto a la diferencia de valores en dirección longitudinal y en función de la altura dentro del tronco de la probeta, no se aprecian grandes diferencias. Todos los intervalos de confianza se solapan entre sí, por lo que no existe una diferencia significativa, y por tanto se puede deducir que la variación del tiempo en el plano longitudinal no es dependiente de la altura en el tronco.

Esto puede deberse a la forma en la que las vetas de las probetas están dispuestas, los tablones de los que hemos sacado las probetas. Las vetas, muestran que las probetas centrales son las que más se ajustan al concepto de dirección radial y transversal, debido a que son las que tienen las vetas más paralelas, más rectas y que mejor coinciden con las caras. En otras probetas las vetas se encuentran en una dirección diagonal respecto a las caras y al final lo que eso supone es un efecto combinado de dirección radial y dirección transversal. Por lo que el valor más fiable es el de la probeta central.

4.4 Resistencia a compresión axial

Los resultados obtenidos para este ensayo han sido los que se muestran en los siguientes apartados. En primer lugar se ha realizado una comparación por grupos de probetas. Después se ha hecho una comparación global por tablones.

4.4.1 Comparación por grupos de probetas

Cabe recordar, que cada probeta cúbica se ha cortado de manera que se han obtenido otras cuatro probetas, todo ello para la realización de este ensayo. Por tanto los grupos se han formado atendiendo a la probeta cúbica de la que provenía cada probeta. Es decir, que los grupos de probetas son de cuatro y pertenecen a una misma probeta cúbica. Además, los cálculos se han separado por probetas pertenecientes al mismo tablón.

Los resultados se muestran en los gráficos 7, 8 y 9 y a su vez en las tablas 19, 20 y 21.

Tabla 19. Comparación compresión axial por grupos de probetas (Tablón A).

Grupo de prob.	Presión de compresión (MPa)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
ACM1	56,86	7,56	6,05	50,81	62,91
ACM2	50,24	3,53	2,83	47,42	53,07
ACM3	50,24	3,77	3,01	47,23	53,26
ACM4	55,34	4,91	3,93	51,41	59,26
ACM5	51,40	2,10	1,68	49,72	53,09
ACM6	51,22	5,90	4,72	46,50	55,93

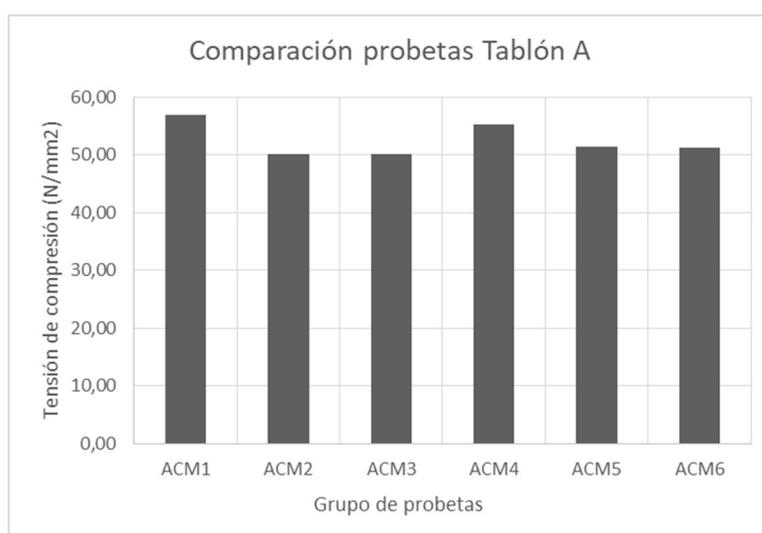


Gráfico 7. Comparación de probetas a compresión axial, tablón A.

Tabla 20. Comparación compresión axial por grupos de probetas (Tablón B).

Grupo de prob.	Presión de compresión (MPa)				Min	Max
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)			
BCM1	45,35	1,14	0,91		44,44	46,26
BCM2	51,09	3,52	2,82		48,27	53,90
BCM3	48,95	3,93	3,15		45,80	52,09
BCM4	45,56	1,23	0,98		44,58	46,54
BCM5	50,43	3,03	2,42		48,00	52,85
BCM6	48,65	3,08	2,46		46,18	51,11

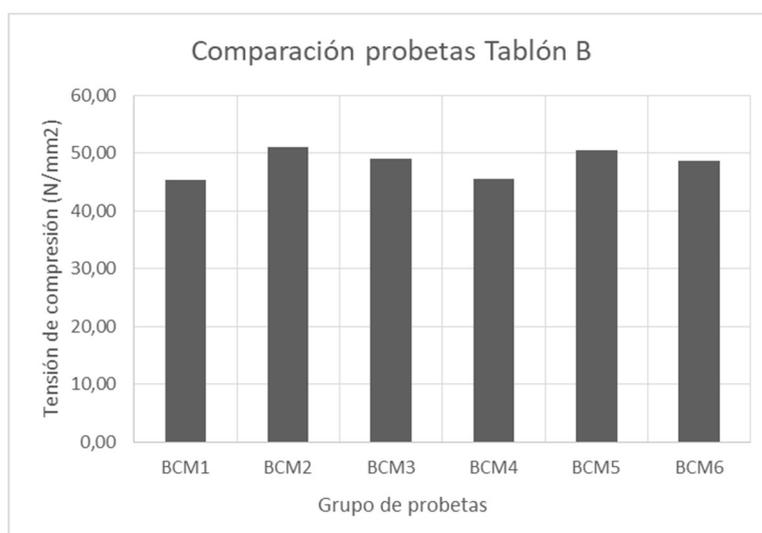


Gráfico 8. Comparación de probetas a compresión axial, tablón B.

Tabla 21. Comparación compresión axial por grupos de probetas (Tablón C).

Grupo de prob.	Presión de compresión (MPa)				Min	Max
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)			
CCM1	54,91	6,04	4,83		50,08	59,74
CCM2	49,89	5,02	4,02		45,88	53,91
CCM3	49,74	3,48	2,79		46,96	52,53
CCM4	51,85	4,43	3,55		48,30	55,40
CCM5	51,74	1,67	1,34		50,40	53,08
CCM6	51,18	3,04	2,43		48,75	53,61

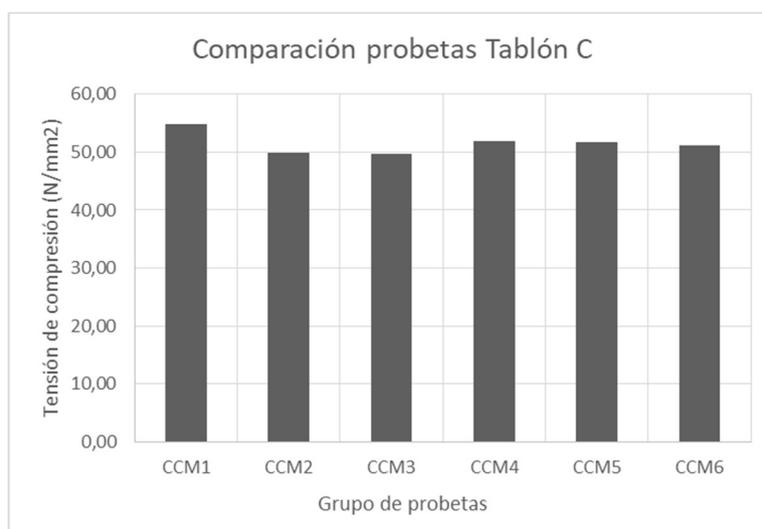


Gráfico 9. Comparación de probetas a compresión axial, tablón C.

Se observa que el valor de compresión es relativamente constante (oscila entre 45 y 56 MPa), además, la mayoría de oscilaciones en el valor se produce en pares de probetas, las cuales en su disposición natural del tronco están dispuestas una sobre la otra. Por tanto, se puede afirmar que los valores de compresión varían a lo largo del plano transversal del tronco.

Sin embargo, los análisis estadísticos muestran que la mayoría de intervalos de confianza entre grupos de probetas para el valor de compresión axial se solapan, de hecho, solamente hay dos grupos de probetas cuyos intervalos de confianza no se solapan: BCM1 y BCM2 o BCM4 y BCM5 (que son equivalentes).

Por tanto, aunque se observe una diferencia del valor de compresión a lo largo del plano transversal del tronco no se puede considerar que sea significativa.

4.4.2 Comparación entre tablones

En este caso se ha realizado una comparación entre tablones del valor de resistencia a compresión axial. Los resultados se pueden observar en la tabla 22 y el Gráfico 10

Tabla 22. Comparación de compresión axial entre tablones.

Tablón	Presión de compresión (MPa)				
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)	Min	Max
A	52,55	1,93	1,54	51,01	54,09
B	48,34	1,19	0,95	47,39	49,29
C	51,55	1,55	1,24	50,32	52,79

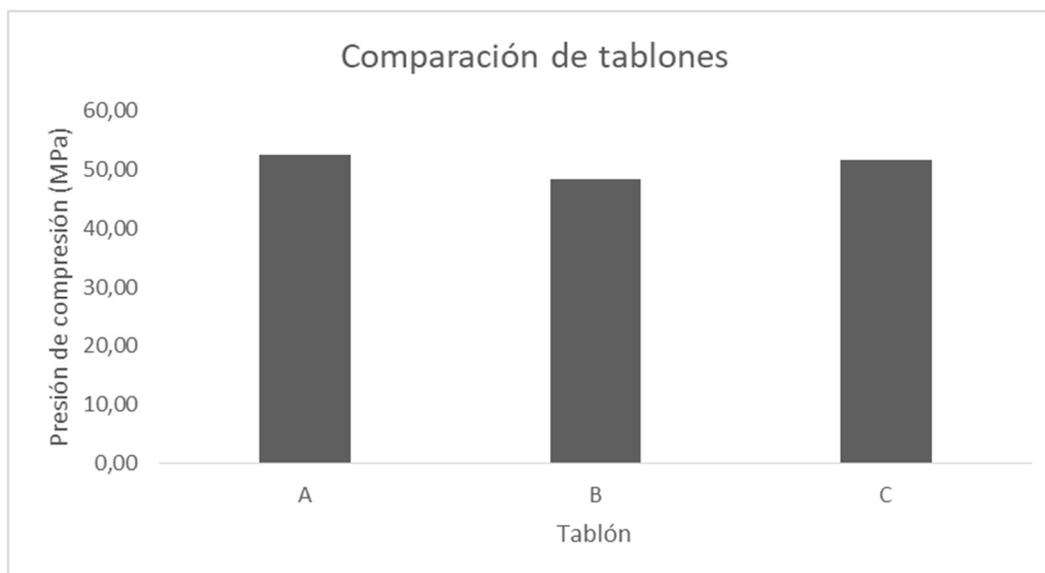


Gráfico 10. Comparación de resistencia a compresión entre tablones.

Se observa que, aunque los tres están dentro del rango de 48 a 53 MPa, existen ligeras diferencias entre tablones. En el análisis estadístico podemos observar que los intervalos de confianza de los tablones A y C se solapan, por lo tanto no hay una diferencia significativa entre ellos. Sin embargo, el intervalo de confianza del tablón B, no se solapa con ningún otro, aunque la diferencia para solaparse con el intervalo de confianza del tablón C sería de 1,03 MPa, lo cual se puede llegar a despreciar y considerar que su intervalo de confianza se solapa también.

4.4.3 Discusión

En primer lugar, se ha podido observar al realizar la comparativa de probetas que los valores sí que se ven afectados por la posición en el plano perpendicular del tronco, puesto que la varianza de valores se sucede en pares de probetas que, como se ha mencionado anteriormente, su posición es contigua en sentido vertical; es decir, que si estuvieran dispuestas dentro del tronco del árbol de manera natural una de ellas estaría sobre la otra.

También hay que tener en cuenta que las vetas varían puesto que los tablones no pertenecen al mismo lugar de la sección transversal del tronco, y eso puede afectar al valor de las propiedades de la madera. De hecho, distinguiendo el dibujo de las vetas en las probetas se distingue que las del tablón A y las del tablón C son muy similares, y lo mismo ocurre con los gráficos de A y C donde los valores se corresponden y son similares, a diferencia de B que tiene un dibujo de las vetas bastante diferente al igual que su esquema.

Por otro lado se aprecia que la diferencia del valor de compresión global entre tablones no es excesiva, los tablones A y C vuelven a ser similares entre sí mientras que B varía en un grado algo mayor.

4.5 Resistencia a compresión perpendicular

En este caso no se han podido mostrar los valores comparados entre grupos de probetas puesto que ciertos valores han sido nulos. Esto se ha debido a que el material del laboratorio es limitado, la máquina universal de ensayos en ocasiones no es capaz de medir valores tan

pequeños y precisos, puesto que está más enfocada a ensayos más agresivos con grandes cargas.

Sin embargo, sí que se ha podido realizar una medida global de cada tablón que se muestran en la tabla 23 y el gráfico 11.

Tabla 23 Resultados de resistencia a compresión perpendicular.

Tablón	Presión de compresión (MPa)				Min	Max
	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza (5%)			
Superior	8,92	0,37	0,29		8,63	9,22
Intermedia	9,52	1,17	0,87		8,65	10,39
Inferior	9,04	0,50	0,35		8,69	9,39

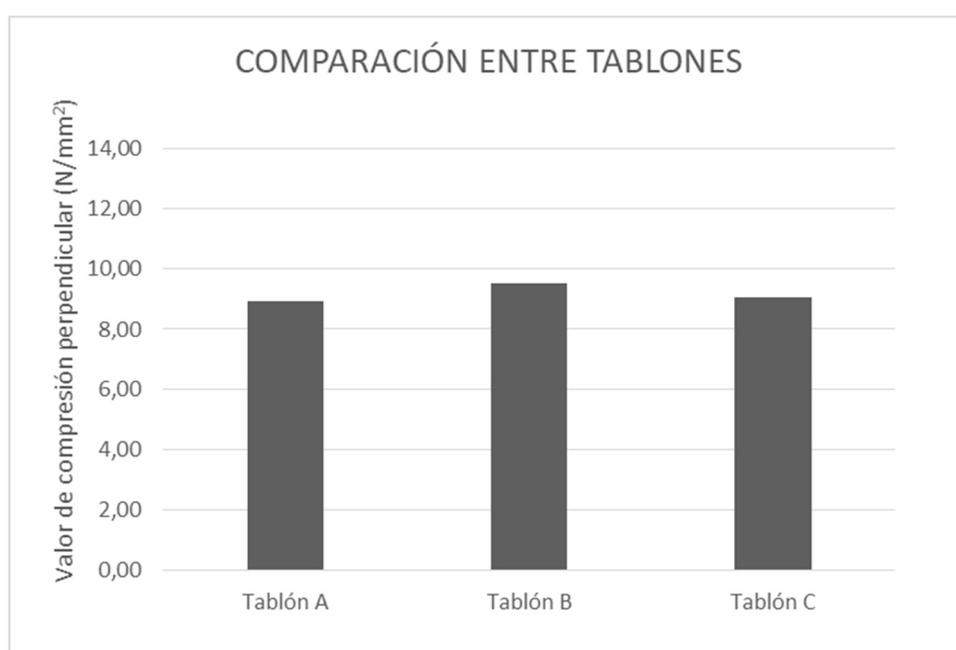


Gráfico 11. Valores globales de compresión perpendicular de los tablones.

4.5.1 Discusión

Se puede apreciar que la diferencia es mínima entre los valores de compresión perpendicular medios de cada tablón. Además, los tres intervalos de confianza se solapan por lo que se puede asumir que no existe una diferencia significativa de este valor entre tablones.

5 Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos.

En este apartado se detallan las tareas llevadas a cabo para realizar este proyecto, en el siguiente apartado se muestra un diagrama de Gantt que resume de una manera visual las tareas aquí descritas.

5.1 Reuniones con el tutor

Las reuniones con el tutor son una tarea esencial. Cada vez que comienza una tarea se hace necesario que el tutor explique los fundamentos y los pasos a seguir de la actividad que se va a realizar, y cuando se termina dicha actividad el tutor debe corregir y comprobar que todo se ha llevado a cabo correctamente. Todo esto, sin tener en cuenta la disponibilidad vía e-mail del tutor, para responder dudas puntuales o corregir documentos.

En este caso, las reuniones con el tutor se han hecho antes de comenzar a redactar para tener una idea global del proyecto y, además, para explicar de qué manera se busca la información necesaria para el mismo, métodos de redacción, cómo se realizan las citas, etc. Además el tutor ha mostrado una gran atención por e-mail. Se estima que la duración media de cada reunión ha sido de unas dos horas.

5.2 Búsqueda de información previa

Una vez habiéndose reunido con el tutor para aclarar de qué manera se va a desarrollar el proyecto y con todos los conceptos claros, se ha procedido a realizar una búsqueda de información previa: artículos académicos, normas, información de páginas web oficiales, libros, etc.

Esta búsqueda de información no ha cesado en todo el tiempo en el que se ha estado redactando la memoria del proyecto; ya que, aunque se haya realizado una búsqueda previa a la redacción del mismo, la información ha debido aumentarse a medida que el tiempo ha discurrido.

5.3 Introducción y Estado del Arte

Utilizando la información obtenida y con los consejos y directrices del tutor, se ha redactado la introducción y el estado del arte del proyecto. Esta ha sido una de las tareas más largas de todo el proyecto, puesto que se ha necesitado la recopilación de mucha información de distinta índole que después ha habido que plasmar en el documento, identificando los puntos clave de cada apartado y explicándolo de la manera más clara y concisa posible.

5.3.1 Reuniones con el tutor para realizar ensayos

Las reuniones con el tutor se han dado antes y después de realizar ensayos, al igual que las reuniones anteriormente descritas, son aquellas en las que el tutor ha dado la base y el proceso a seguir para que se realicen los ensayos pertinentes y; después, una vez finalizada la tarea, comprobar los datos y ayudar a sacar conclusiones.

5.3.2 Búsqueda de normas

Una vez realizada la reunión con el tutor para realizar ensayos, se ha procedido a la búsqueda de toda la normativa necesaria para realizar los ensayos. La normativa necesaria

consiste principalmente en terminología, propiedades del material ensayado y lo más importante, la metodología para realizar los ensayos.

5.3.3 Preparación de probetas

Esta tarea es la primera que se ha realizado antes de proceder a ensayar el material. La madera venía en forma de tres grandes tablones que ha habido que acondicionar para su uso como probetas. Cada uno de los tres tablones se ha cortado con una sierra de mesa en probetas más pequeñas de tal manera que se han obtenido 15 probetas por cada tablón (9 para ensayar a compresión perpendicular y 6 para ensayar a compresión longitudinal).

Después ha habido que lijar todas las probetas con una lijadora, porque el acabado de la sierra era bastante irregular, lo cual impedía el uso de esas probetas para el ensayo de conductividad y difusividad térmica.

Además, hay que señalar que una vez realizados los ensayos no destructivos sobre las probetas que han sido destinadas a compresión longitudinal, se han vuelto a cortar con sierra para obtener más probetas, consiguiéndose 4 probetas por cada 1 de las que se tenían. Esta vez la sierra ha sido bastante más precisa, debido a que la hoja era más fina, y no ha hecho falta lijarlas de nuevo.

5.3.4 Ensayos de Densidad y Humedad

Una vez preparadas las probetas se han realizado los ensayos no destructivos en primer lugar. Los primeros han sido el de densidad y humedad.

Para la densidad se han medido las dimensiones de las probetas en sus tres direcciones y su peso. Con estos dos datos se ha hallado la densidad de cada probeta.

Para la humedad se ha optado por el método de la resistencia eléctrica. Un equipo con dos punzones que se han clavado sobre la madera ha dado el porcentaje de humedad que poseía cada probeta.

Estos datos han servido para comenzar a caracterizar la madera.

Mencionar que todos los ensayos se han ido realizando al mismo tiempo que se realizaba la memoria, han sido dos procesos que han sucedido al mismo tiempo.

5.3.5 Ensayos de Conductividad Térmica y Calor Específico

Después de haber realizado los ensayos de densidad y humedad se ha procedido a realizar estos ensayos. Este ha sido el ensayo que más tiempo ha consumido con diferencia debido a que los ensayos son muy lentos de realizar. El equipo tarda unos 5-6min en realizar una sola medición, teniendo en cuenta que se han realizado unos 150 ensayos, el proceso supera las 15 horas de ensayos que se han repartido durante varias semanas.

En primer lugar se han ensayado las probetas que posteriormente se han ensayado frente a compresión longitudinal. Este proceso se ha repetido 3 veces, variando el valor de potencia que el equipo proporciona al sensor, de 200mW a 225mW y posteriormente a 250mW.

Después se han medido los valores del otro tipo de probetas, en este caso solo se han hecho mediciones de las posiciones contiguas entre probetas, puesto que al comparar estos valores con los de las primeras probetas se ha podido apreciar que son prácticamente iguales y que no se van a encontrar una variación suficiente entre probetas longitudinales y probetas perpendiculares como para afirmar que hay una variación, por lo que se ha dejado de hacer ensayos de este tipo.

Este ha sido el ensayo que más tiempo ha consumido con diferencia debido a que los ensayos son muy lentos de realizar. El equipo tarda unos 5-6min en realizar una sola medición, teniendo en cuenta que se han realizado unos 145 ensayos, el proceso supera las 15 horas de ensayos que se han repartido durante varias semanas.

5.3.6 Velocidad de Propagación de Ultrasonidos

A continuación se ha realizado el ensayo de Ultrasonidos, se ha realizado sobre todas las probetas.

En las probetas de compresión perpendicular solo se ha realizado la medición longitudinal entre los dos extremos.

En las probetas de compresión axial, se han tomado medidas de velocidad de propagación de ultrasonidos en las tres direcciones de la probeta (axial, transversal y radial).

La razón por la que este ensayo se ha dejado para el final de los no destructivos es el gel que se aplica sobre las probetas para el mejor funcionamiento y mayor exactitud de medida de los electrodos del equipo. Este gel, al aplicarse sobre la madera es absorbido por la misma, puesto que es un material higroscópico. Si hubiéramos hecho este ensayo al principio, este podría haber alterado las mediciones de humedad en la madera por la absorción del gel.

Con este ensayo se han realizado 81 medidas, medidas que no han llevado más de 3 minutos.

5.3.7 Resistencia a compresión axial

Este ensayo es uno de los destructivos y por ello se ha realizado de los últimos. En este caso, sólo se han ensayado las probetas destinadas a compresión axial. Como se ha mencionado previamente, las probetas se han cortado nuevamente y por cada probeta que se tenía se han obtenido cuatro probetas. La muestra ha pasado de ser de 18 probetas a 72.

Una vez preparadas las probetas se han medido sus dimensiones de ancho y largo para, de esta manera, obtener un valor de tensión más exacto, ya que las medidas de las probetas no eran exactas. Después se ha procedido a ensayarlas a compresión con el equipo del laboratorio.

Una vez guardados todos los valores de fuerza de las probetas se ha calculado la tensión de compresión, utilizando el dato de superficie de cada probeta.

5.3.8 Resistencia a compresión perpendicular

A continuación, se ha realizado el ensayo de compresión perpendicular sobre las probetas restantes, en este caso no ha habido que medir ningún valor de superficie, puesto que el ensayo se ha realizado con ayuda de unas chapas de espesor constante de 4 cm, que sumados con la anchura de la probeta hacen una superficie de 20cm².

Al ensayarse se han obtenido ciertos problemas debido al equipo de laboratorio, y ciertos ensayos han sido nulos. Eso ha impedido que se pueda comparar el valor de resistencia a la compresión perpendicular entre los tres tablones, pero sí que se ha podido calcular el valor global de los tres tablones conjuntos. El cual es suficiente para caracterizar esta propiedad de la madera objeto de estudio.

5.3.9 Análisis de resultados y discusión

Una vez realizados todos los ensayos y teniendo todos los datos guardados, se ha hecho un análisis de los datos y una discusión posterior. Con ayuda del tutor se han observado las similitudes de las propiedades de este tipo de madera entre tablones de diferentes zonas del árbol, o que incluso pueden ser de distintos ejemplares de árboles. Al igual que las diferencias entre probetas.

Con todo esto se ha llegado a ciertas conclusiones que posteriormente se han plasmado en el apartado de conclusiones.

5.3.10 Metodología seguida en el desarrollo del trabajo

Se han descrito de la manera más breve y concisa posible todas las actividades realizadas hasta el momento para la realización de este proyecto.

Además se ha incluido un diagrama de Gantt en el que se muestra de manera visual todo el proceso de realización del trabajo.

5.3.11 Aspectos económicos

Se ha realizado un presupuesto del trabajo desarrollado. Se han tenido en cuenta factores como: personas involucradas en el mismo (tutores, técnico de laboratorio, etc.), materiales usados (probetas, material de oficina, etc.), amortizaciones de los equipos del laboratorio y demás equipos utilizados, etc.

Finalmente se han reunido todos los gastos y se ha presentado el precio final del producto.

5.3.12 Conclusiones

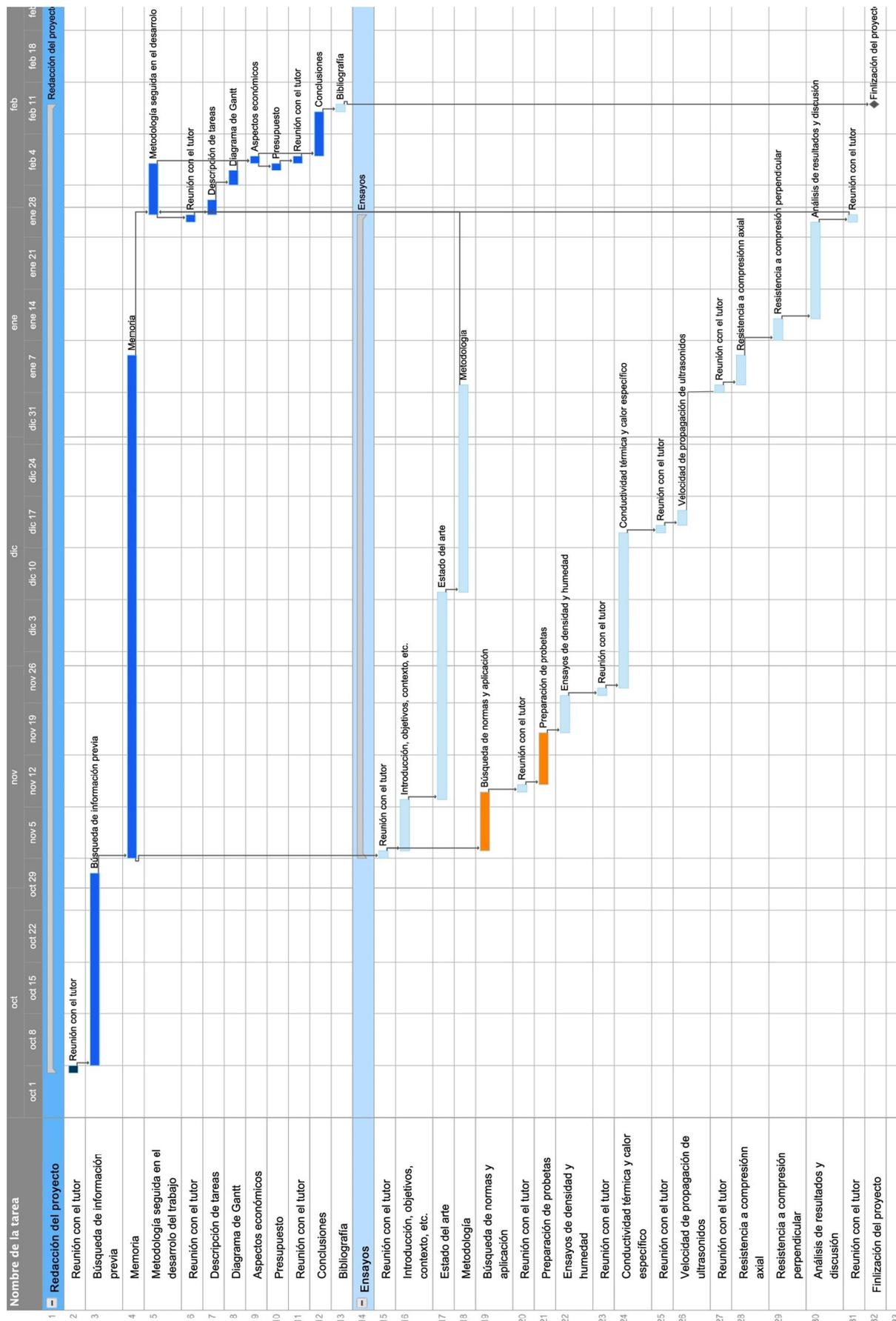
A continuación, se han definido las conclusiones del trabajo y se han redactado de manera resumida. De esta manera se da la información clave de todo el trabajo sin extenderse en detalles, de manera que el usuario que simplemente quiera conocer las conclusiones del trabajo pueda hacerlo accediendo a este apartado sin tener que leerse grandes cantidades de información.

5.3.13 Bibliografía

Una vez completadas todos los apartados anteriores se ha insertado la bibliografía, la cual muestra todas las fuentes de información que han sido utilizadas a lo largo del proyecto y que aparecen referenciadas en el texto.

En este momento se da por finalizado el proyecto.

5.4 Diagrama de Gantt/cronograma.



6 Aspectos económicos

6.1 Descripción del presupuesto y/o del presupuesto ejecutado.

En este apartado se muestran los gastos que ha supuesto la realización de este proyecto. Que se separan en las siguientes partidas:

- **Horas internas:** Se consideran horas internas a todas las horas empleadas en realizar el trabajo dentro de la universidad, como puede ser haciendo ensayos en el laboratorio o en las reuniones con el tutor, etc. Se tendrán en cuenta las horas empleadas por el tutor, segundo tutor técnicos de laboratorio que han participado en el proceso.
- **Horas externas:** Se consideran horas externas a las que el alumno ha utilizado para realizar el proyecto por su cuenta, sea en la biblioteca o en cualquier otra parte externa a la universidad.
- **Amortizaciones:** Esta parte hace alusión a los recursos materiales como son el equipo informático utilizado, software de ofimática, equipos técnicos utilizados para los ensayos, etc.

Los materiales, como la probeta; o la electricidad, irán catalogadas aparte. Los costes indirectos suponen el 7% del subtotal de las partidas anteriores. Todo esto se encuentra detalladamente explicado a continuación (tablas 24, 25, 26, 27, 28, 29 y 30).

Tabla 24. Horas internas

Horas Internas	Horas (h)	Coste Horario(€/h)	Total (€)
Alumno	100	7,00	700,00
Técnico de laboratorio	6	30,00	120,00
Director 1	60	40,00	2.400,00
Director 2	25	40,00	1.000,00
Total			4.220

Tabla 25. Horas externas

Horas Externas	Horas (h)	Coste Horario(€/h)	Total (€)
Alumno	250	7,00	1.750,00
Total			1.750,00

Tabla 26. Amortizaciones

Amortizaciones	Coste (€)	Uso (h)	Vida útil (h)	Amortización (€)
Equipo de compresión	18.000,00	60	40.000	27,00
Equipo de ultrasonidos	12.000,00	25	35.000	8,57
Equipo térmico	8.500,00	80	35.000	19,43
Sierra de mesa	150,00	8	7.200	0,17
Disco de corte	100	8	200	4,00
Lijadora de mano	50,00	8	7.200	0,06
Equipo humedad	665,00	6	28.000	0,14
Ordenador portátil alumno	945,00	250	10.000	23,63
Ordenador portátil escuela	570,00	100	7.200	7,92
Licencia Office	119,00	250	1600	18,60
Total				109,52

Tabla 27. Materiales

Materiales	Unidades (u)	Coste por unidad (€/u)	Total (€)
Tablones de madera de pino	3	0,00	0,00
Mterial de oficina (folios, bolígrafos, etc.)	1	5,00	5,00
Total			

Tabla 28. Electricidad

Electricidad	Unidades (u)	Potencia (W)	Uso (h)	Consumo (kWh)	Coste kWh (€/kWh)	Total (€)
Ordenador portátil alumno	1	60	250	15,0	0,14	2,10
Ordenador portátil escuela	1	60	100	6,0	0,14	0,84
Total						2,94

Tabla 29. Gastos

Gastos	Total (€)
Materiales	5,00
Electricidad	2,94
Internet	90,00
Total	97,94

Tabla 30. Descargo de gastos

Descargo de gastos	Total (€)
Horas internas	4.220
Horas externas	1.750
Amortizaciones	109,52
Gastos	97,94
Subtotal	6.177,46
Costes indirectos (7%)	432,42
IVA (21%)	1.297,27
Total	7.907,15

Por tanto, el coste total del proyecto (IVA incluido) asciende a 7.907,15 € (SIETE MIL NOVECIENTOS SIETE EUROS CON QUINCE CÉNTIMOS).

7 CONCLUSIONES.

Debido a los últimos avances tecnológicos y el auge de la madera en la construcción se ha realizado este proyecto, que ha consistido en una caracterización de las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de la madera pino radiata d. don.

Después se ha partido de tres tabloncillos de dicho material y se han obtenido una serie de probetas que han sido ensayadas en el laboratorio para conocer su humedad y densidad, Su conductividad térmica en las diferentes direcciones, su velocidad de transmisión de ultrasonidos en las diferentes direcciones y su resistencia a compresión axial y perpendicular. Después de tomar todos los datos y de hacer un análisis de los mismos, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- El uso de la madera en el ámbito de la construcción está creciendo, se puede observar en el auge de los paneles CLT y las estructuras de dicho material, que cada vez se construyen de mayor envergadura. Esto es debido a que la gente está más concienciada con el medio ambiente y sabe lo que este material supone, además se trata de un producto prefabricado de buena calidad y excelentes propiedades muy demandado en el ámbito de la construcción.
- La madera objeto de estudio se puede considerar madera seca, pues su humedad es menor del 20%, y con una densidad media de 559 kg/m³. Se encuentra dentro de los rangos esperables tal y como se ha observado en referencias de otros autores [22].
- De acuerdo a los valores obtenidos en resistencia a compresión axial y perpendicular, una resistencia característica de 51MPa y 9MPa respectivamente, la madera de pino estudiada se puede clasificar como C24 según CTE. Esta clase de madera es apta para uso estructural por su óptima resistencia.
- Tal y como los resultados muestran, la conductividad térmica es significativamente mayor en el sentido longitudinal del tronco de madera que en su dirección radial o transversal, más concretamente un 20% mayor que en los otros dos sentidos. Esto significa que actuará como mejor aislante térmico si está dispuesta con las caras de los sentidos perpendiculares hacia el exterior.
- No se ha observado que ninguna propiedad varíe dependiendo de la altura del tronco a la que se encuentre, al contrario que en sentido perpendicular; donde sí se ha observado que dependiendo del lugar del plano transversal del tronco en el que se esté situado aparecen ciertas variaciones que, a veces no son significativas pero en ocasiones se deberían tomar en cuenta.
- No se ha observado ninguna diferencia estadísticamente significativa a lo largo del plano transversal en los valores de compresión axial, sin embargo sí que se han observado variaciones de hasta un 12% entre probetas que son dependientes de la dirección del veteado.
- No se ha observado ninguna diferencia significativa del valor de compresión perpendicular a lo largo de la altura del tronco ni a lo largo del plano transversal.

- Se considera que la forma actual en la que la madera es cortada en los aserraderos y lugares donde se produce dicho material es óptima de por sí. Puesto que la manera más común de sacar tablones de un tronco es cortándolos en su sentido longitudinal, de tal manera que la alta conductividad térmica y rápida velocidad de transmisión de ultrasonidos se suceden en la sección más pequeña, aparte de que los tablones siempre son colocados de tal manera que se evita que haya influencias generadas por la dirección longitudinal.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Asociación Española del Comercio en Industria de la Madera. LA MADERA: natural y renovable. 2016. Último día accesado: 18-02-2019. URL: <http://www.aeim.org/index.php/madera-natura-renovable/>
- [2] Rojo J. Aislamiento térmico, tipos y características. 2019. Último día accesado: 18-02-2019. URL: <https://www.rtarquitectura.com/aislamiento-termico-tipos-y-caracteristicas/>
- [3] Murua JR, Albiac J, Astorkiza I, Eguía B, Ferrero A, Moreno J. Libro blanco del sector de la madera. 1st ed. Vitoria-Gasteiz: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, 2016.
- [4] Pollio V, Perrault C. Compendio de los diez libros de arquitectura de Vitrubio. 1st ed. Madrid, 1761.
- [5] Borràs X. Breve historia de la madera como material de construcción. 2010;2010. Último día accesado: 18-02-2019. URL: <http://www.interempresas.net/Madera/Articulos/44265-Breve-historia-de-la-madera-como-material-de-construccion.html>
- [6] Iturralde Martín A. Qué es y qué ventajas tiene el sistema constructivo de "entramado ligero". 2019. Último día accesado: 18-02-2019. URL: <http://www.noem.com/que-es-y-que-ventajas-tiene-el-sistema-constructivo-de-entramado-ligero/>
- [7] Frangi A, Fontana M, Hugi E, Jübstl R. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. Fire Safety Journal;44:1003.
- [8] Asociación de investigadores de las industrias de la madera. Madera en Construcción y Estructuras: Información General. 2019;2019. Último día accesado: 18-02-2019. URL: https://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_191_construccion.pdf
- [9] Asociación de investigadores de las industrias de la madera. Paredes de madera. 2019;2019. Último día accesado: 18-02-2019. URL: http://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_22_tabiques.pdf
- [10] Herzog T, Natterer J, Schweizer R, Volz M, Wolfgang W. Timber construction manual. 1st ed. Berlin, 2008.
- [11] Asociación de investigadores de las industrias de la madera. Último día accesado: 18-02-2019. URL: http://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_40_mecanicaEstructural.pdf
- [12] Consejo Finandés de la Madera. Propiedades térmicas de la madera. 2019. Último día accesado: 18-02-2019. URL: <https://www.woodproducts.fi/es/content/propiedades-termicas-de-la-madera>
- [13] Hasegawa M, Takata M, Matsumura J, Oda K. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. Ultrasonics 2011;51:296-302.
- [14] Tippner J, Hrivnák J, Kloiber M. Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood using Acoustic Methods. Acoustic tests of wood 2016:503.

- [15] Saneamientos de Estructuras de Madera, Sanite. Estimación del módulo de elasticidad: Clase Resistente mediante Ultrasonidos. 2018;2019. Último día accesado: 18-02-2019. URL: <https://sanite.es/estimacion-del-modulo-de-elasticidad-clase-resistente-mediante-ultrasonidos/>
- [16] Orbe A, Cuadrado J, Rojí E, Maturana A. Arquitectura y madera. Guía de diseño de elementos estructurales adaptada al CTE. 2ª ed. : Lur, 2010.
- [17] Hot Disk AB. Hot Disk Thermal Constants Analyser, Instruction Manual. , 2016.
- [18] Makul N, Rattanadecho P, Agrawal DK. Applications of microwave energy in cement and concrete – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014;37:715-33.
- [19] Dackermann U, Elsener R, Li J, Crews K. A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. Construction and Building Materials 2016;102:963-76.
- [20] Krautkrämer J, Krautkrämer H. Ultrasonic Testing of Materials. 4th ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- [21] Proceq. Manual de operación pundit 200.
- [22] Fernández JI, Conde M, Hermoso E, Carballo J. Madera de pino radiata: conclusiones tras 25 años de trabajos. Boletín de información técnica nº 252 2008;1. Último día accesado: 18-02-2019. URL: <https://docplayer.es/19445360-Madera-de-pino-radiata-conclusiones-tras-25-anos-de-trabajos.html>