



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster Universitario en Ingeniería de Montes

**Caracterización elasto-mecánica de vigas de
tableros de fibras reforzados con fibra de
vidrio**

Alumno: David López Sotelo

Tutor: Luis Acuña Rello

Septiembre 2015

Índice de contenido

1	Resumen	1
2	Introducción y antecedentes	2
2.1	Introducción	2
2.2	Propiedades de la madera	2
2.2.1	Propiedades físicas	2
2.2.2	Propiedades mecánicas	4
2.2.2.1	Resistencia a tracción paralela y perpendicular a la fibra	5
2.2.2.2	Resistencia a compresión paralela y perpendicular a la fibra	6
2.2.2.3	Resistencia a flexión	6
2.2.2.4	Resistencia al esfuerzo cortante	7
2.2.3	Propiedades elásticas	7
2.3	Cola	9
2.4	Fibra de vidrio	9
2.5	Análisis de la normativa de ensayo aplicable	10
3	Objetivos	17
4	Material y métodos	18
4.1	Datos generales del muestreo	18
4.2	Equipos de trabajo	19
4.2.1	Máquina Universal de ensayos E.L.I.B.-100 W Ibertest	20
4.2.2	Equipo complementario	23
4.3	Metodología empleada	25
4.3.1	Descripción general	25
4.3.2	Recepción y acondicionamiento de las probetas	26
4.3.3	Selección de probetas a utilizar	26
4.3.4	Ensayo mediante método destructivo para obtener MOR y MOEG	27
4.3.4.1	Determinación del Módulo de elasticidad global en flexión (MOEG)	27

4.3.4.2	Determinación de la resistencia a la flexión axial (MOR).	30
4.3.5	Determinación de la densidad y humedad de la madera	34
4.3.5.1	Determinación de la humedad de las probetas	34
4.3.5.2	Determinación de la densidad de las probetas.....	38
4.3.6	Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos	39
4.3.6.1	Análisis descriptivo	39
4.3.6.2	Análisis comparativo	40
5	Resultados y discusión.....	41
5.1	Introducción	41
5.2	Análisis descriptivo de las variables estudiadas.....	41
5.2.1	Análisis descriptivo de humedad y densidad para probetas Testigo, A y B	42
5.2.2	Análisis descriptivo de las variables deformación, MOEG y MOR en probetas Testigo.....	43
5.2.3	Análisis descriptivo de las variables deformación, MOEG y MOR en probetas A.....	47
5.2.4	Análisis descriptivo de las variables deformación, MOEG y MOR en probetas B.....	51
5.3	Estadística comparativa de las variables estudiadas	55
5.3.1	Análisis comparativo de la variable deformación para probetas Testigo, A y B.....	55
5.3.2	Análisis comparativo de la variable MOEG para probetas Testigo, A y B.....	57
5.3.3	Análisis comparativo de la variable MOR para probetas Testigo, A y B.....	59
6	Conclusiones.....	62
7	Bibliografía.....	64
	Anejos.....	66

RESUMEN

Alumno: David López Sotelo
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
Titulación de: Máster Universitario en Ingeniería de Montes

1. RESUMEN

La madera es un material que resulta apto para ser utilizado como elemento estructural debido a que además de ser un material natural tiene unas buenas propiedades físicas (dureza, ligereza, efecto aislante) y es un material relativamente resistente en cuanto a sus propiedades mecánicas. El mayor inconveniente que presenta es su bajo Módulo de elasticidad (la mitad que el del hormigón y 20 veces menor que el del acero). Por este motivo desde la década de los años 90 se está estudiando añadir fibras artificiales con elevadas propiedades elastomecánicas sobre todo de Módulo de elasticidad que mejoren las características elastomecánicas de la madera.

En el presente Trabajo Fin de Máster (En adelante TFM) se ha realizado una caracterización elastomecánica de un total de 60 probetas de tableros de fibras de las cuales 20 probetas pertenecen a muestras de tableros de fibras sin refuerzo, 20 muestras presentan un refuerzo de 5 mm de fibra de vidrio y otras 20 muestras presentan un refuerzo de 10 mm de fibra de vidrio. Para realizar la caracterización elastomecánica se ha realizado un ensayo destructivo de los tableros de fibras en base a la Norma UNE-EN 408 "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas" determinando los valores de deformación de las probetas, Módulo de elasticidad global en flexión (MOEG) y Módulo de Rotura (MOR).

Una vez finalizado el ensayo destructivo se ha realizado un tratamiento estadístico de los datos obtenidos. Los resultados obtenidos reflejan que la adición de fibra de vidrio mejora considerablemente las propiedades elastomecánicas de los tableros de fibras en cuanto a deformación, Módulo de elasticidad global en flexión y Módulo de rotura lo cual mejora la aptitud de la madera para ser utilizado como elemento estructural.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

2.1. Introducción

En este apartado se procede a realizar una descripción de la madera utilizada en el presente TFM analizando las singularidades de la madera y sus diferentes propiedades para ser utilizada como elemento estructural.

La madera es un material que posee por lo general unas buenas propiedades físicas (dureza, ligereza, efecto aislante, baja dilatación térmica, etc) y unas propiedades mecánicas que varían en cuanto a su resistencia según trabajemos de manera perpendicular o paralela a la fibra, pero que no se ven afectadas por la acción del fuego como les ocurre a otros materiales como el acero empleados en construcción. Además cuenta con la ventaja de ser un material natural, abundante en la naturaleza y en comparación con otros productos empleados en la construcción (acero, hormigón, etc.), la madera presenta una alta resistencia a flexión, sobre todo si se compara con su propio peso, y una buena resistencia a compresión, siempre paralelas al sentido de las fibras (Argüelles et al., 2000). Estos factores son los que hacen a la madera un material apropiado para su uso en la construcción.

La madera estructural se utiliza para la fabricación de diferentes piezas como:

- Piezas principales constituidas por vigas, arcos, pórticos y otras formas estructurales.
- Piezas secundarias constituidas por correas o viguetas que se apoyan sobre las piezas principales.
- Paneles de cubierta que forman el cerramiento y a la vez proporcionan impermeabilidad a la cubierta
- Sistemas de arriostamiento para garantizar la estabilidad transversal de la construcción.

2.2. Propiedades de la madera

2.2.1. Propiedades físicas

Las características físicas de la madera desde el punto de vista estructural se resumen a continuación:

- Material anisótropo:

Debido a su estructura fibrosa las propiedades físicas y mecánicas de la madera no son isotrópicas. La dirección de las fibras condiciona las características y el comportamiento de la madera. Estas direcciones se pueden clasificar en 3 tipos:

- Axial: en la dirección de las fibras

- Radial: perpendicular a las fibras

- Tangencial: Perpendicular a las 2 anteriores y tangente a los anillos de crecimiento.

- Humedad:

El contenido de humedad en la madera se define como la masa de agua contenida en la madera expresada como porcentaje de masa anhidra (AITIM, 2011).

La humedad en la madera depende del contenido de agua en la misma pudiendo presentarse en tres formas diferentes:

- Agua de constitución: forma parte de los compuestos químicos que constituyen la madera y su eliminación supone la destrucción del material.

- Agua de impregnación: es el agua que está contenida en las paredes celulares. Tiene gran influencia sobre las propiedades físico-mecánicas de la madera. A medida que disminuye el grado de humedad aumenta la resistencia mecánica, sin embargo algunas propiedades como la tenacidad o la resistencia al choque decrecen. Por otra parte, este agua se mantiene en un grado de equilibrio con el ambiente. Cuando las paredes celulares se encuentran saturadas de agua se dice que se ha alcanzado el punto de saturación de fibras cuyo valor está comprendido entre un 28 % y un 30 %.

- Agua libre: es el agua que se encuentra por encima del punto de saturación de fibras llenando las cavidades de la célula. No tiene influencia sobre sus propiedades mecánicas y físicas, aparte de su densidad aparente.

- Densidad:

La densidad expresa la relación que existe entre la masa y el volumen de la madera cuando esta se encuentra al 12% de humedad (AITIM, 1971). Las maderas se pueden clasificar por su densidad de la siguiente forma:

Tabla 1 - Clasificación de la madera por su densidad (VIGNOTE PEÑA S. MARTÍNEZ ROJAS I., et al. 2005).

Tipo de densidad	Valor (Kg/m ³)
Ligera	< 500
Semiligera	500-599
Semipesada	600-649
Pesada	650-799
Muy pesada	>800

2.2.2. Propiedades mecánicas

La madera sometida a cargas tiene un comportamiento denominado visco-elástico, es decir, ante una carga inferior al límite elástico se deforma perdiendo la deformación cuando cesa la carga. La diferencia respecto a otro tipo de material elástico es que en el caso de la madera la deformación ante una cierta carga aumenta con el tiempo.

En lo que respecta a los valores de resistencia la madera es un material relativamente resistente en dirección longitudinal mientras que en dirección transversal su resistencia es muy pequeña.

Las principales características en cuanto a propiedades mecánicas de la madera son:

- Elevada resistencia a la flexión, sobre todo en relación con el peso (la relación resistencia/peso supera 1,5 veces la del acero y 10 veces la del hormigón).
- Buena capacidad de resistencia a la tracción y a la compresión paralelas a la fibra.
- Escasa resistencia cortante. Esta limitación se presenta también en el hormigón pero no en el acero.
- Escasa tendencia a la tracción y a la compresión perpendicular a la fibra, especialmente en tracción, lo cual supone una característica muy particular respecto a otros materiales.
- Bajo módulo de elasticidad, su valor es la mitad que el del hormigón y 20 veces menor que el del acero. Por este motivo surge el interés de utilizar fibra de vidrio como refuerzo para mejorar las propiedades mecánicas de la madera.

Tabla 2 - Comparación entre tensiones admisibles (kp/cm^2) de la madera clasificada, hormigón y acero (FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J. L. et al. 2000).

Material	Flexión	Tracción		Compresión		Cortante	Densidad (kg/m^3)	Módulo elasticidad
		Par	Perp.	Par.	Perp.			
Madera sin defectos	155			120	25	20	460	110000
Madera pino C24	110	60	2	90	23	11	460	110000
Madera roble D30	132	79	2,6	101	35	13	650	100000
Hormigón	80	6		80		6	2400	200000
Acero	1700	1700		1700		1000	7850	210000

Como se ha comentado antes la madera es un material anisótropo. El árbol produce una estructura tubular hueca que tiene una gran eficacia para resistir esfuerzos de flexión debidos al viento y esfuerzos de compresión por su propio peso. Ambos esfuerzos generan tensiones paralelas a las fibras.

Debido a la anisotropía de la madera, para definir las propiedades mecánicas de la misma se han de considerar 2 de las 3 direcciones principales de la madera: dirección paralela a la fibra y dirección perpendicular a la fibra.

2.2.2.1. Resistencia a tracción paralela y perpendicular a la fibra

Es el esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en la misma dirección y sentidos opuestos, provocando elongaciones longitudinales.

La madera posee una elevada resistencia a la tracción paralela a las fibras, motivada por la elevada resistencia que las cadenas de celulosa presentan ante esta sollicitación mecánica. Por el contrario, su resistencia a tracción perpendicular es muy baja, del orden de 30 a 70 veces inferiores. Así si los valores característicos de esta propiedad en dirección longitudinal en madera clasificada de coníferas presentan valores entre 110 y 210 kg/cm^2 , los correspondientes a la dirección transversal apenas alcanzan los 3 a 4 kg/cm^2 . Esta falta de resistencia transversal es debida a la orientación longitudinal de la estructura de la madera, muy preparada para resistir los esfuerzos de flexión a que se ve sometido el árbol en pie.

Se puede afirmar que la resistencia a la tracción viene muy afectada por la calidad de la madera pero que no es sensible a la humedad, de ahí que no suelen considerarse factores correctores.

2.2.2.2. Resistencia a compresión paralela y perpendicular a la fibra

La madera, en la dirección de las fibras, resiste menos a compresión que a tracción, siendo la relación del orden de 0,5, aunque variando de una especie a otra de 0,25 a 0,7.

Las singularidades de la madera (nudos, bolsas de resina, fendas) influyen de manera directa en la resistencia de la madera, siendo mayor la resistencia a tracción paralela a las fibras que la compresión paralela a las fibras para la madera libre de defectos.

La resistencia a compresión depende directamente del contenido de humedad de la madera en el momento del ensayo mientras que la calidad de la madera afecta menos que en tracción (FERNANDEZ-GOLFIN et al. 2000).

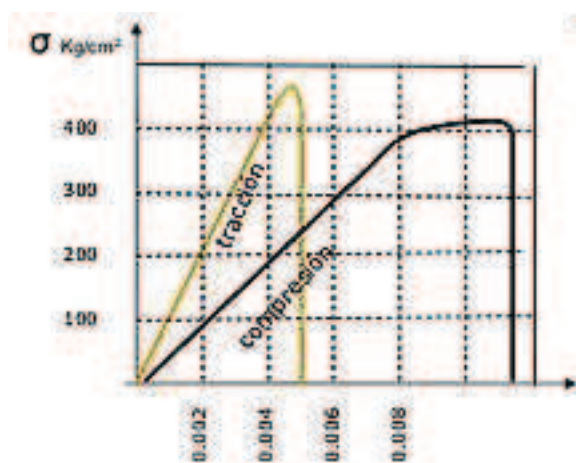


Figura 1 – Relación tensión-deformación de una conífera libre de defectos a tracción y compresión

2.2.2.3. Resistencia a flexión

La madera presenta una elevada resistencia a la flexión, sobre todo si se la compara con su densidad.

El Módulo de Rotura (MOR en adelante) refleja la máxima capacidad de carga en flexión del elemento y es directamente proporcional al momento máximo soportado. La flexión genera tensiones (compresión y tracción paralelas a la fibra) que adoptan valores máximos en las fibras extremas de la pieza mientras que en la zona de la fibra neutra las tensiones normales son nulas, por lo que no existe ni tracción ni compresión.

Los valores característicos del MOR en madera clasificada de coníferas varían entre 180 y 350 kg/cm².

La resistencia a flexión depende de si la madera posee defectos o no, tales como nudos, fendas, pues generalmente, en maderas con defectos, la rotura se producirá en estos puntos, no llegando a valores reales que se darían en una pieza libre de defectos.

La influencia de la humedad es significativa también aunque es menos acusada que en compresión y presenta un comportamiento intermedio entre tracción y compresión.

2.2.2.4. Resistencia al esfuerzo cortante

En función de la orientación de la fibra en relación al esfuerzo, el cortante puede generar diferentes tipos de tensiones tangenciales en la madera:

- Tensiones tangenciales de cortadura: las fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo. El fallo se produce por aplastamiento.
- Tensiones tangenciales de deslizamiento: el fallo se produce por el deslizamiento de unas fibras con respecto a otras en la dirección longitudinal.
- Tensiones tangenciales de rodadura: el fallo se produce por rodadura de unas fibras sobre las otras.

En las piezas sometidas a flexión y a esfuerzo cortante las tensiones que intervienen son las de cortadura y deslizamiento de forma conjunta. Sus valores característicos (por deslizamiento) varían entre 1,7 y 3 N/mm² en las especies y calidades utilizadas habitualmente en construcción.

2.2.3. Propiedades elásticas

El diseño de las estructuras de madera se basa en la ley de la elasticidad de Hooke la cual establece que el alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo. Esta relación se mantiene hasta un punto denominado límite elástico, donde la pieza recupera su forma inicial tras retirar la carga. A partir de ese punto el aumento de la carga, supone una deformación permanente en la pieza dentro de la zona plástica.

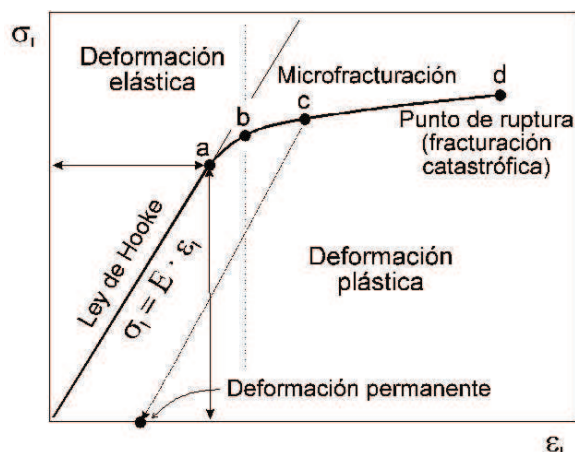


Figura 2 – Diagrama de comportamiento elástico de la madera

- Hasta el punto a nos encontramos dentro de la región elástica de la madera, que responde a la ley de Hooke, donde la deformación es proporcional a la tensión aplicada.

- Al aumentar el esfuerzo y superarse el límite elástico (punto b), la deformación aumenta rápidamente y es en parte permanente. Así, si se disminuye el esfuerzo aplicado lentamente a partir del punto c de la curva, se recorrerá el trayecto indicado por una flecha de puntos hasta alcanzar el punto donde el esfuerzo es nulo, pero existe una cierta deformación permanente (el cuerpo no recupera su longitud original).

- A partir del punto c se empiezan a producir microfisuras en la madera y al aumentar el esfuerzo se llega finalmente al punto d, denominado punto de ruptura, donde la madera experimenta una fracturación catastrófica por cizalla o fisuración extensional.

En el Método de Esfuerzos Admisibles empleado para el cálculo de estructuras, el diseño establece que no se debe sobrepasar el límite elástico de la estructura sometido a cargas de servicio.

Dentro de la zona elástica, el Módulo de elasticidad (MOE) de un material, es la medida de su rigidez (relación entre el esfuerzo unitario y la deformación unitaria).

El Módulo de elasticidad en dirección paralela a la fibra adopta valores diferentes según se trate de solicitaciones de compresión, de tracción o cortante. A efectos prácticos no se diferencia entre esfuerzos de compresión y de tracción y se utiliza un único valor del Módulo de elasticidad para la dirección paralela a la fibra, adoptando el valor aparente del módulo de elasticidad en flexión (que resulta un valor intermedio entre el de tracción y el de compresión). Su valor medio para maderas clasificadas de coníferas varía entre 90000 y 130000 kp/cm², dependiendo de la calidad de la madera. Con respecto al Módulo de elasticidad perpendicular a la fibra, análogamente, se toma un único Módulo de elasticidad cuyo valor en madera clasificada de coníferas varía entre 3000 y 4300 kg/cm² (relación de 1 a 30)

2.3. Cola

Los orígenes del empleo de cola en madera son muy remotos encontrándose elementos encolados en la época de Tutankamon intactos hace más de 3000 años. Sin embargo no fue hasta finales del siglo XVII cuando apareció la primera fábrica industrial de cola en Holanda, debido a que anteriormente la fabricación de la cola se producía de forma artesanal.

A finales del siglo XIX nace la industria del contrachapado que lleva a la fabricación de cola a gran escala. Actualmente se desarrollan principalmente las técnicas del encolado en la edificación.

El ensayo a la rotura exige que se efectúe perpendicularmente al plano de encolado o que, cuando menos, no deje a la vista más que una pequeña parte de la superficie encolada (A. HUGON, M. SERRE, et al. 1983).

El tipo de cola viene definido por el material aglomerante que se emplee, siendo generalmente este producto un polímero. En la actualidad existen en el mercado gran cantidad de polímeros sintéticos.

Para la realización del presente TFM se ha realizado una comparación de varios adhesivos estructurales y debido a obtener una relación calidad-precio óptima se ha optado por utilizar para la fabricación de los tableros mdf un adhesivo estructural de la marca comercial Sika, modelo Sikadur 300.

Se trata de una resina epóxica de 2 componentes, alta resistencia y alto módulo, 100% sólidos, libre de solventes. Presenta una gran adherencia a sustratos como mampostería, maderas, metales, etc. Sus principales propiedades mecánicas se resumen a continuación:

- Resistencia a tensión: 55 MPa (560 kg/cm²)
- Módulo de tensión: 1724 MPa (17580 kg/cm²)
- Deformación a la falla: 3 %
- Resistencia a flexión: 79 MPa (805 kg/cm²)
- Módulo de flexión: 3450 MPa (35180 kg/cm²)

2.4. Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es un material que consta de numerosos filamentos de vidrio extremadamente finos. La lana de vidrio a la que hoy se le llama comúnmente fibra de vidrio no fue ideada hasta 1938 por Russell Games Slayter en la Owens-Corning como un material que podía ser usado como aislante en la construcción de edificios. Además de ser usado como material aislante también se utiliza como un agente de refuerzo de varios productos poliméricos (fundamentalmente plástico). La fibra de vidrio tiene la

ventaja de ser mucho más económica y menos quebradiza que la fibra de carbono, por el contrario presenta el inconveniente de ser menos resistente.

Estudios realizados con diferentes agentes de refuerzo demuestran que la adición de refuerzo de fibra de vidrio a la madera aumenta su fuerza y rigidez. El refuerzo de fibra en la madera puede resultar muy ventajoso en regiones de concentración de esfuerzos (uniones atornilladas) así con los miembros de tracción y flexión. De entre varios agentes de refuerzos considerados (grafito, fibras de compuestos de madera, fibras sintéticas) la fibra de vidrio resulta técnica y económicamente superior en cuanto a valores de rigidez y fuerza de la madera. (R.E. ROWLANDS, R.P. VAN DEWEGHE et al. 1984).

La fibra de vidrio empleada en el presente TFM para reforzar los tableros mdf está fabricada por la casa comercial Owens Corning modelo LT1200 S50. El tejido de vidrio tiene una vida útil de 6 meses si se almacena a temperatura entre -20 °C y 35 °C y humedad relativa entre 45 % y 75 %.

Las principales características de la fibra de vidrio se resumen a continuación:

- Tensión de rotura: 3445 MPa
- Esfuerzo de compresión: 1080 MPa
- Densidad: 2,58 g/cm³
- Dilatación térmica: 5,4 μm/(m°C)
- T^a de ablandamiento: 846 °C

La humedad es un factor importante para la tensión de rotura, pudiendo ser adsorbida fácilmente y causar rupturas y defectos superficiales microscópicos disminuyendo la tenacidad.

2.5. Análisis de la normativa de ensayo aplicable

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

Antiguamente, la calidad de la madera con que se trabajaba se elegía por la proximidad, usando las maderas locales ya que era lo conocido, con lo que se sabía trabajar. Sin embargo, los diferentes tipos de madera presentan características muy variables: diferencias originadas por la dirección tomada (en gran parte a causa de la anisotropía de la madera), por causas genéticas, selvícolas e incluso tecnológicas.

Con el paso del tiempo, fomentado por los avances en cuanto a transporte y comunicación, se produjo un efecto de globalización, siendo accesibles las diferentes clases de madera en casi cualquier parte. Por lo tanto, existía una gran variedad de

normas y clasificaciones para las diferentes maderas, lo que condujo a un estado de confusión ante el desconocimiento de las nuevas maderas disponibles. Con la llegada del libre comercio y el Mercado Único en Europa, surgió definitivamente la necesidad de establecer pautas para determinar una idea común de calidad en toda Europa.

Esta situación da lugar a la creación de normativa que establezca las pautas que marquen los criterios de calidad comunes para reducir la variabilidad, con el objeto de lograr un material homogéneo competitivo.

El Comité Europeo de Normalización (CEN), a través de los Comités Técnicos (TC), es quien redacta la normativa en cuanto a madera aserrada de uso estructural, estableciendo las normas de calidad en cada campo a nivel europeo y protegiendo los intereses de los usuarios.

Algunos de los Comités Técnicos más importantes son el CEN-TC. 250, Eurocódigos Estructurales, y el CEN-TC. 124, quien realiza la normalización en cuanto a la madera aserrada de uso estructural. En dicha normativa se incluye la normalización de las dimensiones y tolerancias UNE-EN-336, la asignación de calidades visuales y especies UNE-EN 1912:2005, la normalización en cuanto a las clases resistentes UNE-EN-338, el método de cálculo para la determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad y de procedimientos de realización de ensayos UNE-EN-384, los métodos de ensayo para la determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas UNE-EN-408, y los requisitos para la clasificación visual o mecánica UNE-EN 14081-1.

En la norma UNE-EN-338, el cálculo del módulo de elasticidad es un paso clave en la asignación de la madera a una clase resistente, por lo que es especialmente relevante el establecimiento de unas pautas comunes para el cálculo efectivo de los valores, que hagan posible la comparación entre centros de investigación.

En los países nórdicos, la asignación de piezas de clases de resistencia baja está influida principalmente por el módulo de elasticidad, mientras que en las zonas altas de clases resistentes están más determinadas por el módulo de rotura (BOSTRÖM 1999). De ahí que la realización del ensayo que aporta estos valores deba ser consistente y fiable.

Según la norma EN-408, en sus inicios en 1995 el método de determinación del módulo de elasticidad en flexión estática se basaba en la aplicación de dos cargas centradas sobre la pieza con una distancia entre los soportes de apoyo de 18 veces la altura de la cara (h).

La medición de la flecha se efectuaba en el centro del vano de aplicación de las cargas, utilizando una longitud de referencia de cinco veces la altura de la cara. De esta manera se habla de un módulo elástico puro ya que no existe intervención de los cortantes.

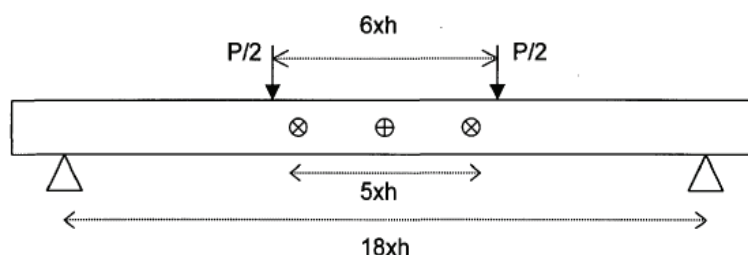


Figura 3 - Ensayo del módulo de elasticidad en flexión (Norma EN-408)

Sin embargo, este método originaba resultados poco fiables (BOSTRÖM, 1999). Además, la ambigüedad de la norma daba la posibilidad de introducir variaciones en el método de ensayo, lo que causó que en los diversos institutos de investigación en que se realizó el ensayo, éste se efectuara de maneras diferentes: el captador podía situarse sobre la fibra neutra, como se hacía en el Swedish National Testing, en el Norwegian Institute of Wood Technology, en el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y en el Technical Research Centre of Finland; o bien podía tomarse la medición en la zona tensionada, como se realizaba en el Swedish Institute for Wood Technology Research. La norma tampoco aclaraba si era necesario realizar la medición en una o ambas caras, ni si el hacerlo podría influir en el cálculo del módulo de elasticidad (SOLLI 1996, citado por BOSTRÖM 1999) lo que daba lugar a diferencias, dependiendo de dónde se hubiera realizado el ensayo.

Otro inconveniente de este método radicaba en que la medición de la deformación se realizara entre los puntos de carga, porque se efectuaba sobre una luz relativamente corta ($5xh$), con lo cual las deformaciones son de apenas unos milímetros, por lo que el captador debe tener una gran sensibilidad para evitar los errores debidos a la pequeña torsión que pueda producirse en el ensayo (SOLLI 1996, citado por BOSTRÖM 1999).

En lugares fuera del marco europeo tales como Estados Unidos, Canadá, Australia y Nueva Zelanda, el módulo de elasticidad en flexión elástica se precisan mediante un ensayo diferente.

En Estados Unidos y Canadá, los ensayos ASTM D4.761 se basan en la medición de la deformación sobre la fibra neutra de la pieza en una relación luz-altura de cara de $17xh$ a $21xh$; sin embargo, en Australia y Nueva Zelanda los ensayos AS/NZS 4063 toman la medida de la deformación en el centro de la viga bajo el tensionado.

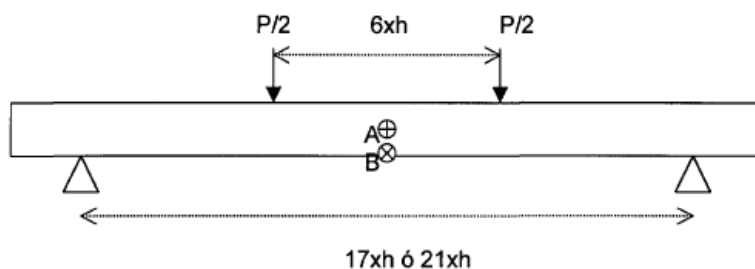


Figura 4 - Ensayo para la medición del módulo de elasticidad según los ensayos norteamericanos, australianos y neozelandeses.

La figura anterior representa dicho ensayo, donde la posición del captador de acuerdo con los ensayos americanos se representa con la letra A, y de acuerdo con los australianos y neozelandeses, con la letra B.

Al cálculo del módulo de elasticidad de esta manera se le conoce como Módulo de Elasticidad Global (MOEG) y al método de medida de la deformación solo en el tercio central, se le denomina Módulo de Elasticidad Local (MOE).

El valor del módulo de elasticidad es influido en gran medida de si se usa uno u otro ensayo, por lo que en ambos casos los resultados dependen del procedimiento de ensayo escogido para introducirlo en las clases resistentes. Esa diferencia es tal debido a que el módulo de elasticidad global incluye un aspecto resistente importante como es el efecto cortante, y los defectos presentes en la madera que influyen de mayor manera en el módulo global.

Para poder contar con unas pautas comunes para la comparación a nivel internacional, se revisó la norma EN-408 de 1998, consistente en tomar la medida de una distancia de $18xh$ de la deformación producida por dos cargas aplicadas en el tercio central de la pieza, sobre la fibra neutra de la pieza, situando el medidor en el centro de la luz entre los apoyos, para introducir el ensayo de módulo de elasticidad en flexión global (MOEG), además de mantener el ya existente módulo local.

Finalmente se llega a la norma europea EN-408 de noviembre 2000, aprobada finalmente en 2001, que añade la novedad de realizar el ensayo del módulo de elasticidad global con el medidor situado en el centro del canto de la pieza (zona traccionada) cargada simétricamente sobre su tercio central.

A este nuevo ensayo se le denomina Módulo de Elasticidad Global de Canto a Flexión (MOEGTO) y abre la puerta a un ensayo más cómodo y rápido de obtención del módulo de elasticidad global, ya que evita el empleo de reglas que deban sujetar el captador para tomar la medida sobre la fibra neutra; el único inconveniente reside en que la norma no especifica detalladamente la forma de realizar la medición, por lo que puede haber disparidad de resultados.

- Norma UNE 338 Madera estructural. Clases resistentes.

Como se ha explicado anteriormente, hasta hace pocas décadas, el suministro de madera se reducía a pocas especies, procedencias y calidades y sin embargo, hoy en día es posible comerciar con especies de todo el mundo, adquirir madera de cualquier calidad y de cualquier procedencia.

Esta situación de globalización ofrece la ventaja de la reducción del precio de la madera, pero al mismo tiempo, se origina una diversificación de calidades en cuanto a valores característicos.

Por ese motivo, la Unión Europea introduce un sistema de clases resistentes basado en los que utilizan en Australia y el Reino Unido, permitiendo emplear normas nacionales de clasificación propias de cada país, sin necesidad de modificarlas.

En Europa, principios de los años 80 se origina el primer sistema para asignar clases resistentes en la norma BS-4978, que definía una serie de clases resistentes en función de unos valores mínimos de resistencia, elasticidad y densidad. Posteriormente a cada clase de resistencia se le asignaban combinaciones especie-calidad, cuyas propiedades mecánicas sean al menos iguales a las descritas como mínimas para cada clase de resistencia.

La norma EN-338 establece y describe un sistema de clases resistentes de uso general en el marco de las normas de cálculo estructural. Indica para cada clase, los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad así como los criterios de asignación de las poblaciones de la madera (es decir, las combinaciones especie-procedencia-calidad). La asignación de las combinaciones especie-calidad a las clases resistentes de la norma EN-338 es realizada por medio de la identificación y clasificación previa del material, lo que hace necesario emplear sistemas de clasificación que cumplan con los criterios establecidos por el Comité Europeo de Normalización en su proyecto de norma EN-14081 Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por resistencia.

El sistema de clases resistentes y la norma EN-338 llevan anexo el uso de otra serie de normas, tales como:

-UNE-EN-408 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas” que establece los criterios generales del muestreo y de los ensayos.

-UNE-EN-384 “Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad” que dicta la forma de cálculo de los valores de resistencia, elasticidad y densidad de la madera.

-UNE-EN-1912 “Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies” que interrelaciona las combinaciones especie-calidad-norma con las clases de resistencia.

-Las normas nacionales de clasificación visual UNE 56544 en España.

La norma EN-338 realiza una distinción entre las clases resistentes de coníferas y de frondosas debido a las grandes diferencias anatómicas existentes entre estos dos tipos de maderas, que provocan grandes diferencias mecánicas entre ambas. Las clases resistentes se establecen mediante un valor en Newton/mm², que indica el valor mínimo de la resistencia a flexión de esa clase, acompañado de una letra según se trate de coníferas (C) o frondosas (D).

En la actualidad existen 12 clases resistentes, que van desde la C14 hasta la C50 para las coníferas, mientras que para las frondosas solamente existen 8, que van desde la D18 hasta la D70, ya que su madera no suele emplearse con fines estructurales.

A continuación se muestra una tabla empleada para la madera aserrada de uso estructural para especies de frondosas, que recoge los valores que van asociados a cada una de las clases resistentes en que podemos clasificar las partidas de madera y otra tabla donde se recogen los valores para las especies de coníferas y el chopo.

Tabla 3 - Madera aserrada. Especies de frondosas. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente.

Propiedades	Clase Resistente							
	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Resistencia (característica), en N/mm²								
- Flexión $f_{m,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70
- Tracción paralela $f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
- Tracción perpendicular $f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
- Compresión paralela $f_{c,0,k}$	18	21	23	25	26	29	32	34
- Compresión perpendicular $f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
- Cortante $f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Rigidez, kN/mm²								
- Módulo de elasticidad paralelo medio $E_{0,medo}$	10	11	12	12	13	14	17	20
- Módulo de elasticidad paralelo 5 ^o -percentil $E_{0,k}$	8,4	9,2	10,1	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
- Módulo de elasticidad perpendicular medio $E_{90,medo}$	0,67	0,73	0,80	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
- Módulo transversal medio G_{medo}	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
Densidad, kg/m³								
- Densidad característica ρ_k	500	520	530	540	550	620	700	900
- Densidad media ρ_{medo}	610	630	640	650	660	750	840	1080

Tabla 4 - Madera aserrada. Especies de coníferas y chopo. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente.

Propiedades		Clase resistente											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistencia (característica) en N/mm ²													
- Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
- Tracción paralela	$f_{t,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
- Tracción perpendicular:	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
- Compresión paralela	$f_{c,k}$	16	17	18	19	20	22	22	23	25	26	27	29
- Compresión perpendicular	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
- Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Rigidez, en kN/mm ²													
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
- Módulo de elasticidad paralelo 5 ^o -percentil	$E_{0,5}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
- Módulo transversal medio	G_{medio}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad, en kg/m ³													
- Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
- Densidad media	ρ_{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

OBJETIVOS

3. OBJETIVOS

Para la consecución del objetivo fundamental de este TFM se realizarán una serie de ensayos mecánicos para una muestra de vigas de tableros de fibras reforzadas con fibra de vidrio. Dichos ensayos se han realizado en el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid).

Los objetivos que se persiguen con el siguiente TFM son los siguientes:

1. Determinación de las propiedades elastomecánicas de vigas de tableros de fibras reforzadas con fibra de vidrio mediante métodos mecánicos de ensayo determinando los valores de los módulos de elasticidad (MOEG) y de rotura (MOR) mediante métodos destructivos para determinar si los valores resistentes obtenidos son suficientes para poder emplearlas como madera para uso estructural.

2. Contrastar los valores y resultados obtenidos en el ensayo con vigas de tableros de fibras reforzadas respecto a tableros de fibras sin refuerzo para ver si mejoran algunas de las propiedades elásticas del material original

MATERIAL Y MÉTODOS

Alumno: David López Sotelo
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
Titulación de: Máster Universitario en Ingeniería de Montes

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Datos generales del muestreo

El material ensayado en el presente TFM se compone de piezas de tableros de fibras de los que se han obtenido 20 piezas completas de 120 cm de longitud x 4 cm de grosor x 6 cm de anchura que servirán de patrón de comparación y un total de 40 piezas de 120 cm x 2-4 cm de grosor x 6 cm de alto que se encolaron dos a dos incluyendo en esa zona de encolado un refuerzo de fibra de vidrio, uno sencillo y uno doble; así tenemos:

- 20 tablas de tablero mdf sin refuerzo.
- 20 tablas de tablero mdf con una capa de fibra de vidrio de 5 mm de espesor.
- 20 tablas de tablero mdf con dos capas de fibra de vidrio de 5 mm de espesor cada una.

El material empleado para la fabricación de las tablas es el tablero de fibras de densidad media (mdf). El tablero de fibras es un tablero compuesto de fibras de madera u otros materiales vegetales parcialmente refinados, afieltrados por sedimentación y/o presión en caliente pudiendo contener resinas u otras sustancias.

El tablero de fibras utilizado para los ensayos fue fabricado por la empresa FINSA. Posteriormente se realizó un encolado de los tableros y se aplicó refuerzo de fibra de vidrio en las probetas correspondientes para realizar la caracterización elastomecánica.

Las principales características del tablero de fibras se resumen a continuación:

- Densidad: 650-800 kg/m³
- Resistencia a flexión: 260 kg/cm²
- Módulo de elasticidad: 23000 kg/cm²
- Resistencia a tracción: 6 kg/cm²



Figura 5 – Conjunto de probetas iniciales

Se han numerado correlativamente las 60 tablas seleccionadas para realizar el ensayo con la siguiente distribución y numeración:

- 1-20 para tablas de tablero mdf sin refuerzo.
- A1-A20 para tablas de tablero mdf con una capa de fibra de vidrio de 5 mm de espesor.
- B1-B20 para tablas de tablero mdf con dos capas de fibra de vidrio de 5 mm de espesor cada una.

Se consideran unas condiciones de temperatura y humedad relativa constante en la realización del ensayo con un coeficiente de variación máximo del 10 %. La temperatura media medida durante el ensayo fue de 20,3 °C y la humedad relativa fue de 16 %.

4.2. Equipos de trabajo

Para la determinación de las propiedades elastomecánicas de la madera se utilizarán métodos mecánicos de ensayo basados en métodos destructivos. La realización del ensayo se ha realizado utilizando la máquina universal de ensayos con

la cual hemos determinado el Módulo de elasticidad global (MOEG) y el Módulo de rotura (MOR)

4.2.1. Máquina Universal de ensayos E.L.I.B.-100 W Ibertest

Para la realización del ensayo destructivo se ha utilizado la máquina universal de ensayos E.L.I.B.-100 W Ibertest.



Figura 6 – Máquina universal de ensayos E.L.I.B.-100 W Ibertest

Este equipo consta de una bancada metálica y resistente de grandes dimensiones, sobre el que se dispondrán los accesorios necesarios, según el tipo de ensayo que queramos realizar.

La maquina funciona con un software a través de un ordenador al que está conectada y que tendrá diferentes opciones de trabajo según las condiciones del tipo de ensayo que queramos realizar. Los datos obtenidos se irán almacenando en el programa.



Figura 7 - Software utilizado para determinar las propiedades elastomecánicas

Para la realización del ensayo destructivo utilizaremos la maquina universal para trabajar a flexión y calcular el MOEG (MPa) y el MOR (MPa), según la Norma UNE-EN-408. Para ello acoplaremos a la maquina un accesorio que consiste en una viga metálica, que presenta dos puntos de carga, para actuar sobre la parte central del canto superior de cada viga. Cada una de dichas vigas se colocara de canto y horizontalmente sobre dos apoyos, variables según las dimensiones de las probetas a ensayar, situados cada uno de ellos en las partes más externas de cada una de ellas. De esta forma estarán paralelas al accesorio metálico que efectuará la carga sobre dos puntos.



Figura 8 – Acoplamiento de las vigas en la Máquina de ensayos

Desde el software controlaremos la colocación de otro de los accesorios que tendremos que utilizar, llamado sensor de deformación o extensómetro. Este estará sujeto en un soporte y se situará en la parte central del canto inferior de cada viga, de forma que entre en contacto ligeramente en posición perpendicular a estas y con el que realizaremos el primero de los ensayos a flexión con el que obtendremos una primera medida de la deformación en la parte central. Una vez concluido este primer ensayo, comenzaremos con el ensayo de rotura definitivo.



Figura 9 - Colocación del extensómetro

4.2.2. Equipo complementario

Además del equipo citado anteriormente para completar los ensayos se ha utilizado diverso material complementario el cual se cita y describe a continuación:

- Rotulador permanente:

Se utiliza para marcar y numerar según la numeración comentada en el punto 4.1 las probetas que se utilizarán en el ensayo destructivo.

- Balanza de precisión digital:

Balanza con precisión de 0,01 g utilizada para pesar las probetas extraídas de parte de las muestras ensayadas para realizar los ensayos de humedad y densidad posteriores al ensayo destructivo.



Figura 10 – Balanza de precisión digital

- Calibre de medición

Utilizado para medir las dimensiones de las probetas extraídas de parte de las muestras ensayadas para obtener el volumen de las probetas y posteriormente calcular la densidad de las mismas.

- Estufa

Estufa con circulación de aire cuya temperatura se mantiene a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.



Figura 11 – Estufa de circulación de aire

4.3. Metodología empleada

4.3.1. Descripción general

Se ha realizado un ensayo destructivo de las probetas seleccionadas mediante el cual se han obtenido valores de deformación, MOR y MOEG para determinar las propiedades elastomecánicas de los 3 tipos de probetas que vamos a ensayar y comparar posteriormente dichas propiedades.

El ensayo se ha realizado en base a la Norma UNE-EN 408 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas” en última revisión publicada en el año 2011 la cual anula y sustituye a la Norma UNE-EN 408:2004. En esta norma se establecen los métodos que vamos a seguir para determinar en laboratorio diversas propiedades físicas y mecánicas de la madera en sus

dimensiones reales de empleo. Estos métodos no están orientados a la clasificación de la madera ni al control de calidad.

4.3.2. Recepción y acondicionamiento de las probetas

Según la Norma UNE-EN 408 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas” todos los ensayos se deben realizar sobre probetas acondicionadas en una atmósfera normalizada de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y $(65 \pm 5)\%$ de humedad relativa. Se considera que una probeta está acondicionada cuando llega a masa constante. Se considera que se ha alcanzado masa constante cuando dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 6 h, no difieren en más de 0,1% de la masa de la probeta.

4.3.3. Selección de probetas a utilizar

En primer lugar se han seleccionado los tableros a utilizar en el ensayo destructivo con la siguiente distribución:

- 20 tablas de tablero mdf sin refuerzo
- 20 tablas de tablero mdf con una capa de fibra de vidrio de 5 mm de espesor
- 20 tablas de tablero mdf con dos capas de fibra de vidrio de 5 mm de espesor



Figura 12 – Selección de los tableros a utilizar en el ensayo

Cada una de las probetas se numerará de 1 a 20 mediante un rotulador con la siguiente numeración y distribución:

- 1-20 para tablas de tablero mdf sin refuerzo.
- A1-A20 para tablas de tablero mdf con una capa de fibra de vidrio de 5 mm de espesor
- B1-B20 para tablas de tablero mdf con dos capas de fibra de vidrio de 5 mm de espesor cada una.

4.3.4. Ensayo mediante método destructivo para obtener MOR y MOEG

Una vez seleccionadas y numeradas las probetas procedemos a realizar el ensayo destructivo con la máquina universal Ibertest situada en el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia.

Este equipo se compone de una bancada de grandes dimensiones en la que se colocan los accesorios adecuados a cada tipo de ensayo y trabaja mediante un software específico que manejamos a través de un ordenador. El software nos va proporcionando diferentes datos que van variando a medida que el ensayo se va realizando:

- Fuerza rotura (kN)
- Carrera (mm)
- Resistencia (MPa)
- Deformación (mm)
- Tiempo (s)

4.3.4.1. Determinación del módulo de elasticidad global en flexión (MOEG)

Para poder realizar este ensayo la longitud de la probeta debe ser como mínimo igual a 19 veces la altura nominal de la sección. El procedimiento operatorio se describe a continuación:

- La probeta se debe cargar en flexión sobre dos puntos simétricos con una luz igual a 18 veces la altura tal y como se indica en la figura 14. Si la probeta y el dispositivo de ensayo no permiten aplicar exactamente estas condiciones, se admite modificar la distancia entre los puntos de carga y los apoyos una longitud no mayor de 1,5 veces el canto de la probeta y la luz y longitud de la probeta pueden modificarse en una cantidad no superior a tres veces la altura como máximo, siempre conservando en el ensayo las condiciones de simetría.

- La probeta debe quedar simplemente apoyada.

- Entre la probeta y los apoyos o los puntos de aplicación de la carga, se pueden introducir unas pequeñas placas de acero, de longitud no mayor que la mitad de la altura de la probeta, con objeto de reducir el aplastamiento de la madera en esas zonas. Si es necesario se pueden introducir topes laterales para impedir el pandeo lateral de la probeta. Estos topes deben permitir la deformación de la probeta sin resistencia de rozamiento significativa. En nuestro caso aplicamos unas pequeñas placas de goma con el objeto de reducir el aplastamiento en las zonas de apoyo de la carga.

- Una vez cargada la probeta se procede a colocar un sensor de deformación (extensómetro) ejerciendo la presión adecuada, según indica el programa informático utilizado, en la parte central del canto inferior de la probeta y en el punto medio de esta. Este sensor mide la deformación de la viga en su punto medio, a medida que se va aumentando la carga hasta la medida establecida, en nuestro caso 1,5 kN. Una vez realizada dicha medición, la máquina universal dejará de ejercer presión sobre la probeta y retiraremos el extensómetro.



Figura 13 – Colocación de extensómetro para medir deformación en punto medio de la probeta

- La carga se debe aplicar con una velocidad constante. La velocidad de desplazamiento de la cabeza de la carga no debe superar los $(0,003 h)$ mm/s.

- La carga máxima aplicada no debe superar $0,4 F_{m\acute{a}x,est}$ (Carga máxima estimada en newtons) y no debe dañar la probeta.

- La carga máxima estimada $F_{m\acute{a}x,est}$ del material ensayado se debe obtener con los resultados de diez probetas como mínimo, de la especie, tamaño y calidad adecuadas o partiendo de datos de ensayo preexistentes adecuados. En nuestro caso hemos ensayado y obtenido resultados de un total de 20 probetas de los 3 tipos ensayados (sin refuerzo, con refuerzo de 5 mm de fibra de vidrio, con refuerzo de 10 mm de fibra de vidrio).

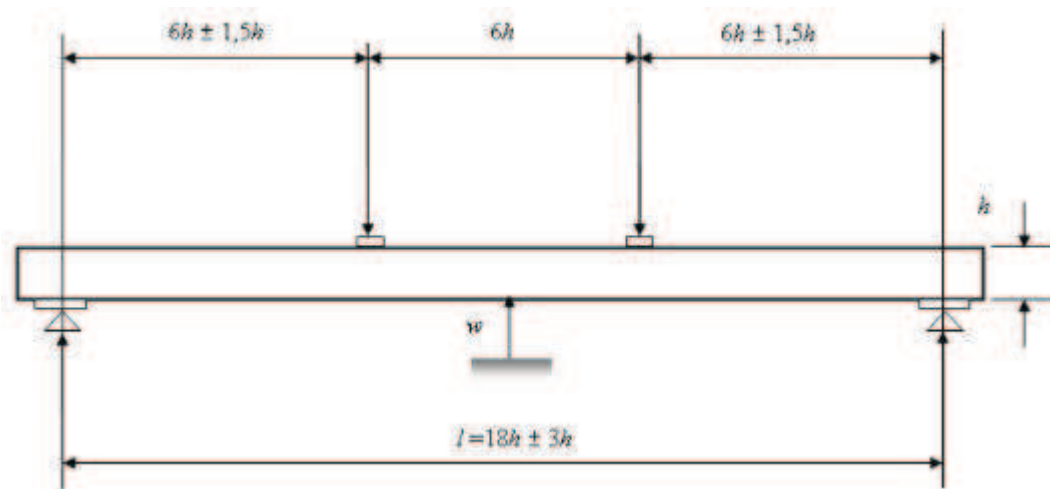


Figura 14 – Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión

- El dispositivo de carga utilizado debe permitir la medición de la fuerza con una precisión del 1 % de la carga aplicada a la probeta o, para cargas inferiores al 10 % de la carga máxima, con una precisión del 0,1 % de la carga máxima aplicada.

- La deformación w debe medirse en el centro de la luz y en el centro del borde traccionado o comprimido. Cuando w se mide en el eje neutro, debe tomarse la media de las mediciones realizadas en ambas caras de la probeta.

- El dispositivo de medición debe ser capaz de medir las deformaciones con una precisión del 1 %, o para deformaciones inferiores a 2 mm, con precisión de 0,02 mm.

La expresión que permite calcular el MOEG en N/mm^2 es la siguiente:

$$E_{m.g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}$$

Donde:

- $F_2 - F_1$: Es el incremento de carga sobre la línea de regresión en newtons, con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor.
- $W_2 - W_1$: Es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ en milímetros.
- a: Es la distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en mm.
- b: Es la anchura de la sección transversal en el ensayo a flexión en mm.
- h: Es la altura de la sección en mm.
- l: Longitud libre de la probeta en mm.
- G: Módulo de elasticidad transversal en N/mm^2 . Si no se conoce G se puede tomar como infinito.

Con el valor del MOEG obtenido una vez finalizado el ensayo destructivo podemos determinar el valor del Módulo de elasticidad local en flexión (MOE) mediante la siguiente expresión:

$$MOE = 1,3 * MOEG - 2690$$

Con el valor del MOE obtenido y basándonos en la Norma UNE 338 “Madera estructural. Clases resistentes” podemos establecer clases resistentes de madera para uso general en el marco de normas de cálculo estructural. Esta clase resistente se establece mediante un valor en $Newton/mm^2$, que indica el valor mínimo de la resistencia a flexión de esa clase.

4.3.4.2. Determinación de la resistencia a la flexión axial (MOR)

Para la determinación de la resistencia a la flexión axial, la probeta debe tener normalmente una longitud mínima de 19 veces la altura de la sección. Cuando esto no sea posible, se debe anotar en el informe de ensayo la luz de la probeta.

El procedimiento operatorio se describe a continuación:

- Para la determinación de la resistencia a la flexión la probeta se debe cargar en flexión simétricamente en dos puntos sobre una luz igual a 18 veces la altura, como se muestra en la figura 15.

- Si la probeta y el equipo de ensayo no permiten alcanzar exactamente estas condiciones, la distancia entre los apoyos y los puntos de aplicación de la carga puede aumentarse hasta una cantidad no mayor que 1,5 veces la altura de la probeta, y la longitud de la probeta y la luz del ensayo pueden variarse hasta una cantidad no superior a tres veces la altura de la probeta, siempre que se mantenga la simetría del ensayo.

- La probeta debe estar simplemente apoyada.

- Entre la probeta y los apoyos o los puntos de aplicación de la carga, se pueden introducir unas pequeñas placas de acero, de longitud no mayor que la mitad de la altura de la probeta, con objeto de reducir el aplastamiento de la madera en esas zonas. En nuestro caso como ya se ha comentado introducimos dos placas de goma para reducir el aplastamiento.

- Se deben introducir topes laterales para evitar el vuelco o pandeo lateral de la probeta de tal forma que estos permitan la deformación de ésta sin provocar resistencia significativa de rozamiento.

-La carga se debe aplicar con una velocidad constante de la cabeza de carga hasta la rotura. La velocidad de avance de la cabeza de carga no debe ser mayor que $(0,003 h)$ mm/s.

- Debe anotarse la carga máxima de flexión ($F_{\text{máx}}$)

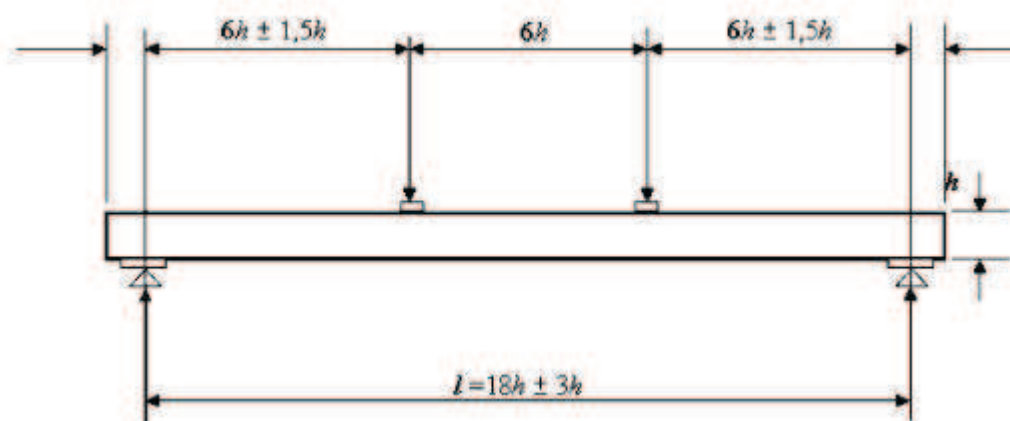


Figura 15 – Dispositivo de ensayo para la medición de la resistencia a la flexión

- El equipo de carga utilizado debe permitir la medición de la carga con una precisión del 1 % de la carga aplicada a la probeta, o para cargas inferiores al 10 % de la carga máxima aplicada, con una precisión del 0,1 % de la carga máxima aplicada.

La resistencia a la flexión (MOR) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

Donde:

- f_m : Es la resistencia a la flexión expresada en newtons por milímetro cuadrado.

- F: Es la carga expresada en newtons

- a: Es la distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión, en milímetros.

- b: Es la anchura de la sección transversal en un ensayo de flexión, o la menor dimensión de la sección transversal, en milímetros.

- h: Es la altura de la sección en los ensayos de flexión, o dimensión mayor de la sección, o altura de la probeta en los ensayos en dirección perpendicular a la fibra, en milímetros.

La resistencia a la flexión se debe de calcular con una precisión del 1 %

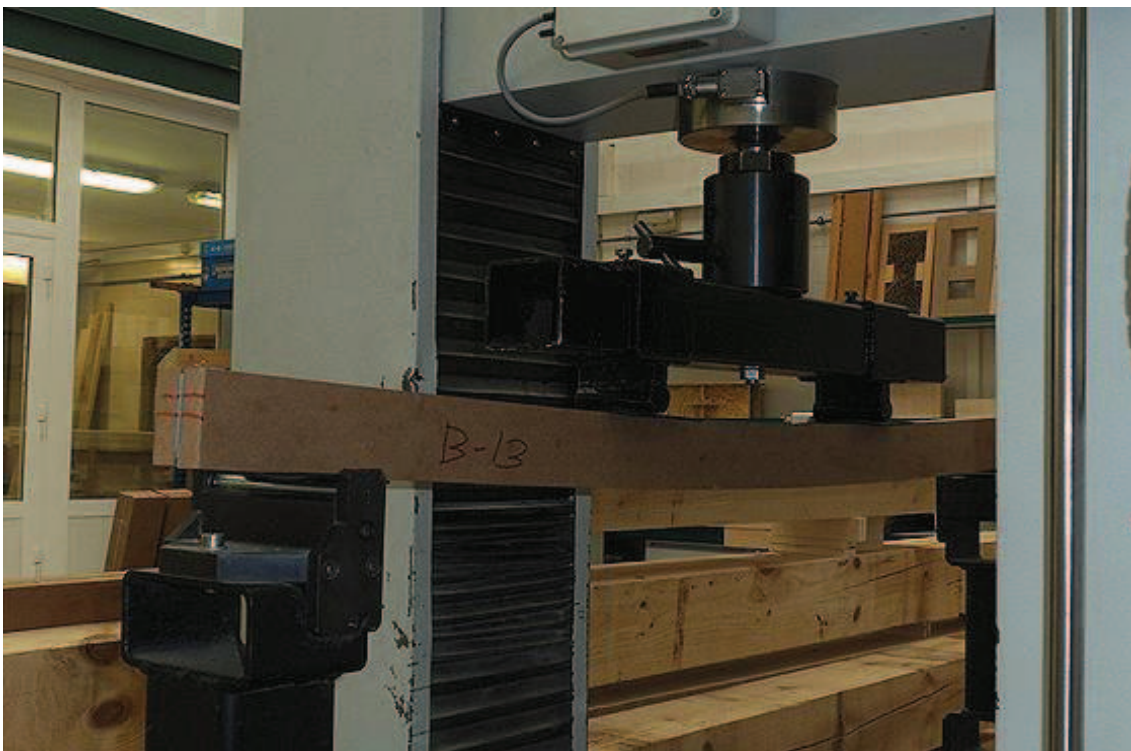


Figura 16 – Ensayo de resistencia a flexión en una probeta con 10 mm de fibra de vidrio

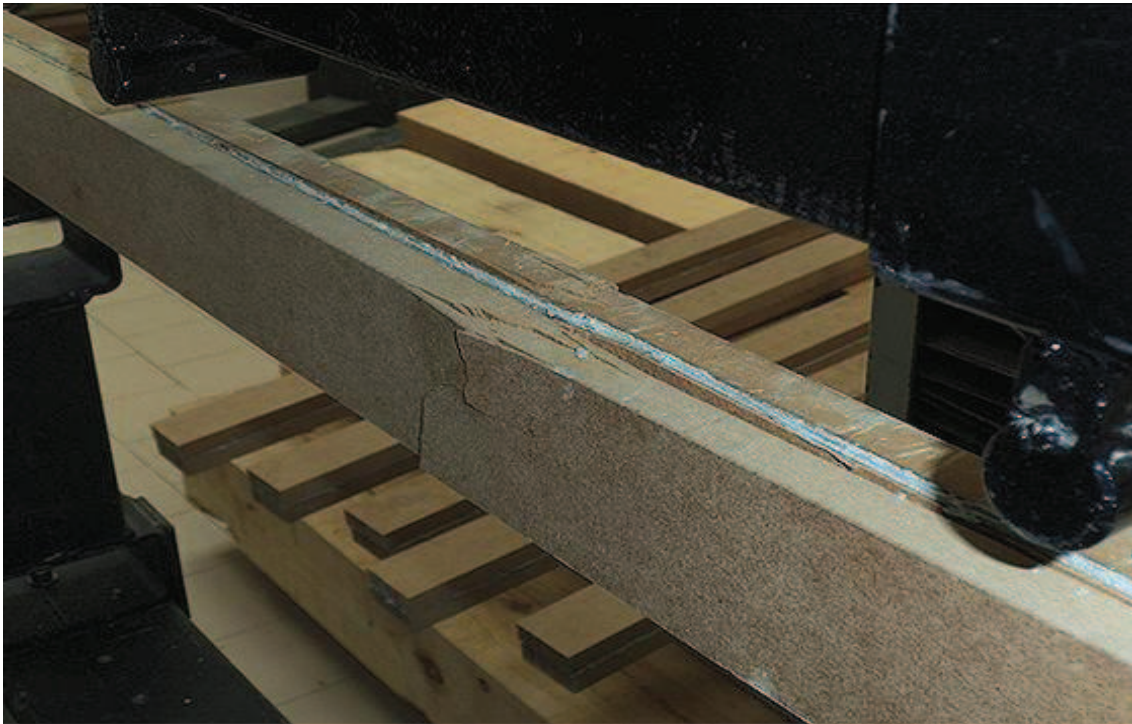


Figura 17 – Detalle de rotura de probeta tipo B tras ensayo de resistencia a flexión



Figura 18 – Rotura de probeta de tablero MDF sin refuerzo de fibra de vidrio

4.3.5. Determinación de la densidad y humedad de la madera

Una vez se han roto las tablas seleccionadas mediante el ensayo destructivo descrito anteriormente para determinar la densidad y humedad de los tableros utilizados en el ensayo se han seleccionado un total de 15 tableros ensayados previamente con la siguiente distribución:

- 5 tablas de tablero mdf sin refuerzo.
- 5 tablas de tablero mdf con una capa de fibra de vidrio de 5 mm de espesor.
- 5 tablas de tablero mdf con dos capas de fibra de vidrio de 5 mm de espesor.

De estas tablas seleccionadas se han extraído probetas de pequeñas dimensiones (6 x 6 x 4 cm aproximadamente).

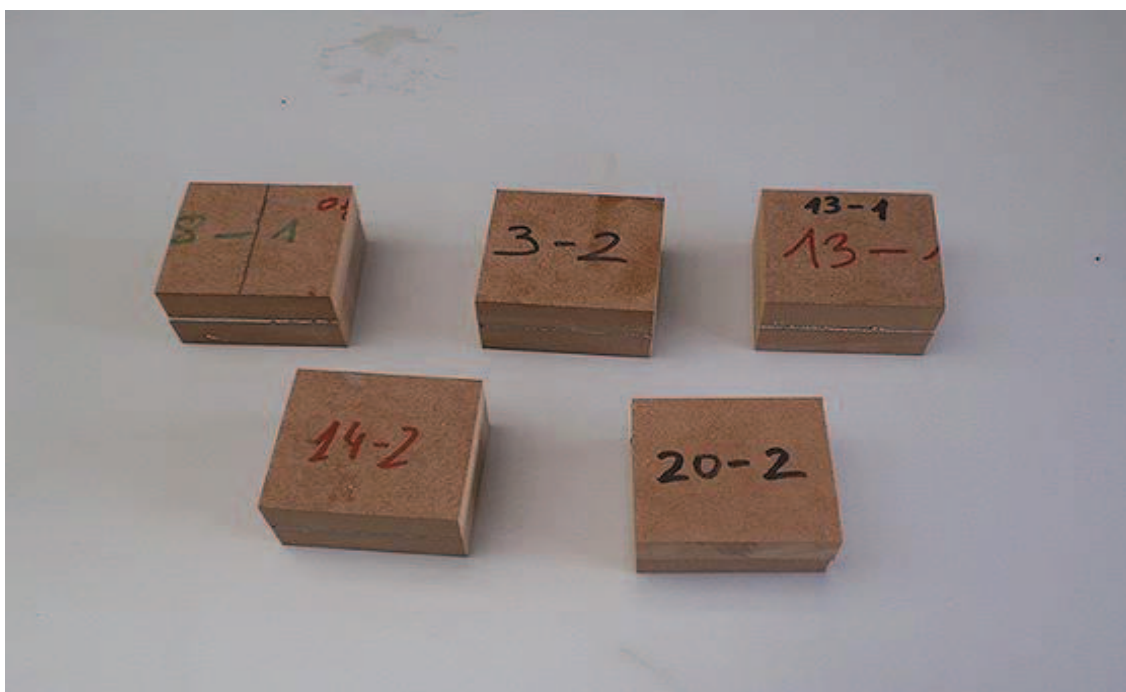


Figura 19 – Probetas extraídas para determinar la densidad y humedad de los tableros

4.3.5.1. Determinación de la humedad de las probetas

La norma UNE-EN 408 establece que la humedad de las probetas se debe determinar sobre una rebanada tomada en ellas de acuerdo con la Norma EN 13183-1 "Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1 Determinación por el método de secado en estufa". Para la madera estructural se debe tomar una rebanada de la sección completa, libre de nudos y bolsas de resina.

El procedimiento operatorio para determinar la humedad es el siguiente:

- Se toma una muestra que incluya toda la sección de la pieza sometida a ensayo de un grosor mínimo de 20 mm en la dirección de la fibra, a 300 mm de distancia de uno de los extremos de la pieza, o en la mitad de su longitud, si la longitud de la pieza es menor de 600 mm. La muestra no debe ser de madera resinosa, o incluir singularidades tales como corteza, nudos o bolsas de resina.

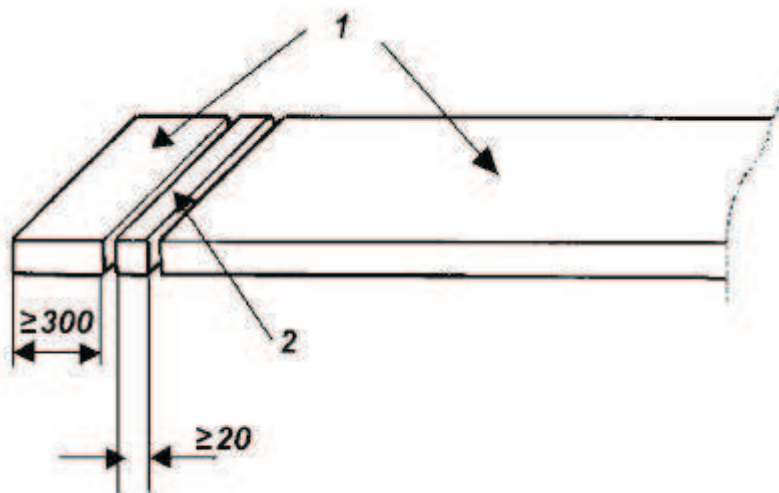


Figura 20 – Extracción de muestra de una pieza sometida a ensayo destructivo para determinación de humedad y densidad

- Se pesa la muestra inmediatamente después de haberla tomado como muestra la figura 21:



Figura 21 – Medición del peso de la muestra anterior a su secado

- Se seca la muestra pesada a una temperatura de (103 ± 2) °C, hasta que la diferencia de masa entre dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 2 horas sea menor del 0,1 %. En nuestro caso las muestras ensayadas han permanecido en estufa durante un periodo de 2 días.



Figura 22 – Secado de las muestras en estufa a $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

- Se realiza la pesada de la masa seca inmediatamente después de sacar la muestra de la estufa.

- Finalmente se determina el contenido de humedad w , expresado en tanto por ciento de la masa aplicando la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

Donde:

- m_1 : Es la masa de la muestra antes de secar, en gramos.

- m_0 : Es la masa de la muestra anhidra, en gramos.

- w: Es el contenido de humedad en tanto por ciento.

4.3.5.2. Determinación de la densidad de las probetas

Según la Norma UNE-EN 408 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas” la densidad de la sección transversal completa de la probeta se debe determinar a partir de una rebanada de la probeta.

Para la madera estructural la rebanada se debe tomar de la sección completa y debe estar libre de nudos y bolsas de resina. Para los ensayos de resistencia, la sección se debe tomar tan cerca como sea posible de la zona de rotura. Para las probetas de ensayos en dirección perpendicular a la fibra, la densidad se debe determinar previamente al ensayo, después del acondicionamiento, partiendo de mediciones de masa y volumen de la probeta completa.

La densidad o peso específico es la relación entre el peso m y el volumen v de una madera.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Siendo:

ρ : Densidad (kg/m^3).

m : Peso de la probeta (kg).

v : Volumen de la probeta (m^3).

Debido a que el peso y el volumen de la madera está afectada por el porcentaje de humedad cuando hablamos de densidad se debe siempre significar la humedad a la que está hecha la medida, es decir que se debe hablar de densidad de la madera a una determinada humedad como puede ser al 0 % (densidad anhidra), al 12 % (densidad normal) o a otra humedad de la madera.

En nuestro caso calculamos la densidad anhidra de las 15 probetas que hemos secado previamente para calcular la humedad de las mismas.

Para determinar el peso de las probetas pesamos las probetas una vez secadas y obtenemos así el peso seco.

Para determinar el volumen de las probetas utilizamos un calibre de medición con el cual mediremos el largo, ancho y grosor de cada una de las probetas seleccionadas con los cuales obtendremos el volumen de las probetas.



Figura 23 – Calibre de medición para determinar el volumen de las probetas

4.3.6. Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos

Una vez finalizado el ensayo destructivo se obtienen valores de deformación, MOR y MOEG para el total de las 60 probetas ensayadas en el software utilizado con la máquina universal de ensayos E.L.I.B.-100 W Ibertest. Estos valores una vez recopilados se introducen en una hoja de cálculo de *Microsoft Excel* para pasar posteriormente a un tratamiento estadístico de los mismos utilizando el programa estadístico *StatGraphics Centurion XV*.

Mediante este programa realizaremos un análisis estadístico de cada una de las variables de interés calculando valores medios, coeficientes de variación, mediana, etc. que nos permitirán realizar un análisis comparativo de los diferentes tipos de tableros ensayados de forma que podamos obtener resultados que nos ayuden a obtener conclusiones que justifiquen los objetivos propuestos en el presente TFM.

4.3.6.1. Análisis descriptivo

En primer lugar se realizó un análisis descriptivo de las 3 variables estudiadas en el ensayo:

- Deformación (mm)
- Módulo de elasticidad global en flexión (MOEG) (MPa)

- Módulo de rotura (MOR) (MPa)

Este análisis nos permite describir las variables de las que disponemos a partir de una serie de medidas de tendencia central, permitiéndonos observar en qué medida los datos se agrupan o dispersan en torno al valor central.

4.3.6.2. Análisis comparativo

Una vez realizado el estudio descriptivo se procedió a realizar el estudio comparativo de las variables. Para ello se utilizó análisis de varianza (ANOVA), en el que se comprobaba si cumplía con las condiciones de normalidad, independencia y homocedasticidad.

En caso de que no se cumpliera con las condiciones descritas anteriormente, el análisis de la varianza (ANOVA) no podría aplicarse, teniendo que acudir a otros métodos no paramétricos como es el caso del test de Kruskal-Wallis. Esta prueba evalúa la hipótesis de que las medianas de las variables estudiadas dentro de cada uno de los 3 poblaciones (Testigo, A y B) son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor y luego se calcula el rango promedio para los datos de cada nivel.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Introducción

En este apartado se va a realizar en primer lugar un análisis de los resultados obtenidos en el ensayo de cada una de las variables ensayadas utilizando para ello la estadística descriptiva. Posteriormente realizaremos una comparación estadística de las variables estudiadas con el fin de obtener unos valores finales diferentes entre las distintas variables estudiadas de forma que obtengamos resultados que justifiquen los objetivos a conseguir con la realización del presente TFM.

5.2. Análisis descriptivo de las variables estudiadas

El análisis descriptivo de las variables estudiadas nos permite ordenar, analizar y representar los datos obtenidos para que podamos describir de forma correcta las características de la población y de cada conjunto de probetas por separado.

Se resumen de forma escueta los principales coeficientes y términos estadísticos utilizados en la estadística descriptiva para cada variable.

- **Media:** se define como la suma de todos los valores de una distribución dividida por el número total de valores considerados. Mide la centralidad de una muestra. Momento de primer orden de una distribución.

- **Varianza:** se define como la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones de los valores de la variable a la media aritmética. Mide la dispersión de los datos de una población.

- **Máximo:** valor máximo del total de valores de la variable.

- **Mínimo:** valor mínimo del total de valores de la variable.

- **Desviación típica:** mide la dispersión y la raíz cuadrada de la varianza con signo positivo.

- **Coefficiente de variación:** mide la dispersión a partir de la relación que existe entre la desviación típica y la media, expresado en %.

- **Sesgo:** mide la asimetría horizontal de una distribución alrededor de un promedio. Cuando el sesgo es igual a 0 la distribución es simétrica; cuando el sesgo es positivo la distribución tendrá una cola asimétrica extendida hacia los valores positivos, mientras que si el sesgo es negativo, la distribución tendrá una cola asimétrica extendida hacia los valores negativos. Momento de tercer orden de una distribución.

- **Curtosis:** mide la mayor o menor acumulación de valores cerca de la media. Momento de cuarto orden de la distribución. Mide el apuntamiento o achatamiento de

la distribución respecto de una distribución normal. Cuando la Kurtosis es positiva la distribución es mas apuntada que la negativa indica que la distribución es achatada.

En el presente TFM se realiza un análisis estadístico de las siguientes variables ensayadas:

- Deformación (mm)
- Módulo de elasticidad global en flexión (MOEG) (MPa)
- Módulo de rotura (MOR) (MPa)

Cada una de estas variables se ha medido en un total de 60 probetas ensayadas con la siguiente distribución y numeración:

- Testigo: 20 tablas de tablero mdf sin refuerzo.
- A: 20 tablas de tablero mdf con una capa de fibra de vidrio de 5 mm de espesor.
- B: 20 tablas de tablero mdf con dos capas de fibra de vidrio de 5 mm de espesor cada una.

En las Tablas 21,22 y 23 de los Anejos del presente TFM figuran los valores obtenidos de cada una de las variables estudiadas para el total de las 60 probetas ensayadas.

5.2.1. Análisis descriptivo de humedad y densidad para probetas Testigo, A y B

Se han seleccionado un total de 5 probetas de las 20 que se han ensayado de cada tipo (Testigo, A y B). De las 5 probetas seleccionadas se ha extraído una muestra de dimensiones aproximadas 6x6x4 cm las cuales se han pesado en húmedo y en seco y se ha determinado su volumen para obtener la humedad y densidad según se describe en el apartado 4 Materiales y métodos.

Los valores medios obtenidos de humedad y densidad se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5 – Valores medios de humedad y densidad para probetas Testigo, A y B

	Testigo	A	B
Humedad (%)	6,428	5,857	5,529
Densidad (g/cm³)	0,737	0,781	0,799

En el caso de la humedad y densidad no se realizará un análisis comparativo de los datos debido a que los materiales de las probetas Testigo, A y B no son homogéneos debido a la adición de fibra de vidrio y, lógicamente, se tendrá una mayor densidad media según se utilice una mayor cantidad de fibra de refuerzo.

5.2.2. Análisis descriptivo de la variables deformación, MOEG y MOR en las probetas Testigo

El resumen de las principales variables estadísticas para la variables deformación, MOEG y MOR en las probetas testigo se muestra a continuación:

Tabla 6 – Resumen estadístico para variables deformación, MOEG y MOR (Testigo)

Nº datos: 20	Deformación (mm) Testigo	MOEG (MPa) Testigo	MOR (MPa) Testigo
Media	12,336	2942,890	26,084
Coefficiente de Variación	1,788%	2,421%	3,000%
Mínimo	11,950	2827,700	24,900
Máximo	12,860	3079,500	27,410
Rango	0,910	251,800	2,510
Sesgo Estandarizado	1,024	1,050	0,060
Curtosis Estandarizada	0,197	-0,388	-1,052

Dentro de los valores obtenidos son de especial interés los valores de Sesgo estandarizado y Curtosis estandarizada, ya que pueden utilizarse como indicadores de que la muestra ensayada provenga de una distribución normal. Si los valores de estos estadísticos se encuentran fuera del rango de -2 a +2 indicarían desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, tanto el valor del sesgo estandarizado como el de la Curtosis estandarizada se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal.

A continuación se exponen los gráficos de caja y bigotes para las 3 variables estudiadas para las probetas Testigo:

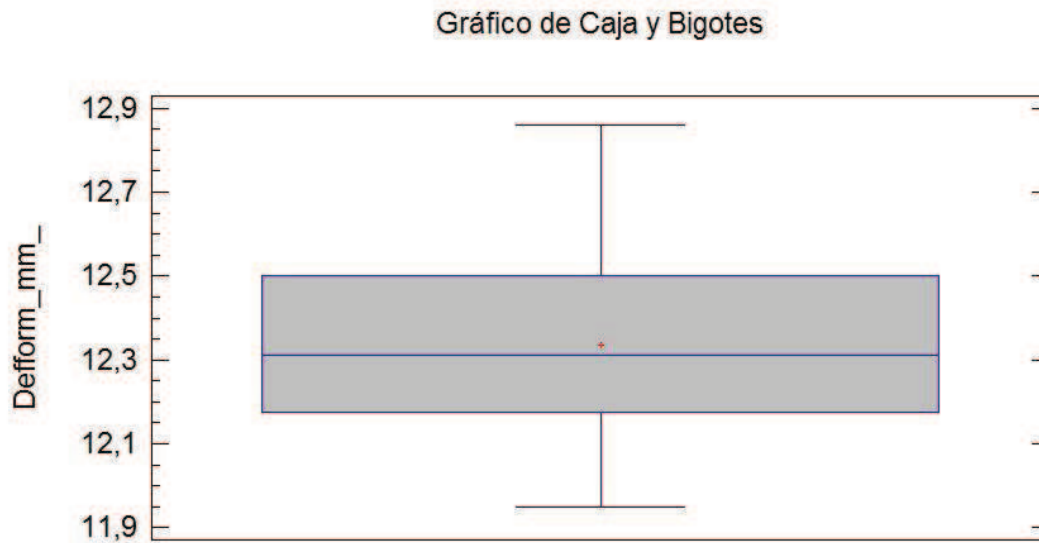


Figura 24 – Gráfico de caja y bigotes para la variable deformación en las probetas Testigo

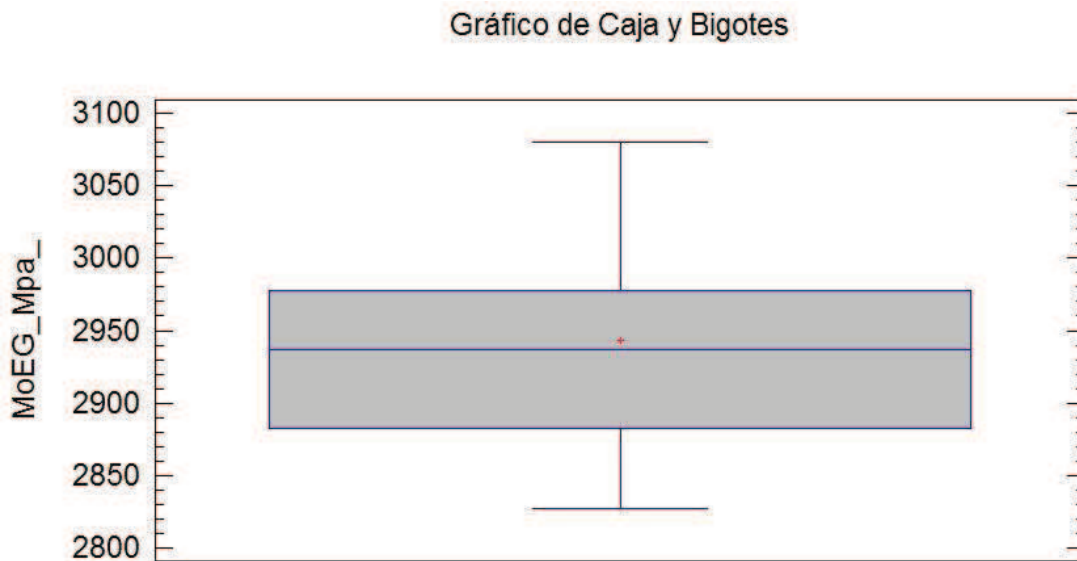


Figura 25 – Gráfico de caja y bigotes para la variable MOEG en las probetas Testigo

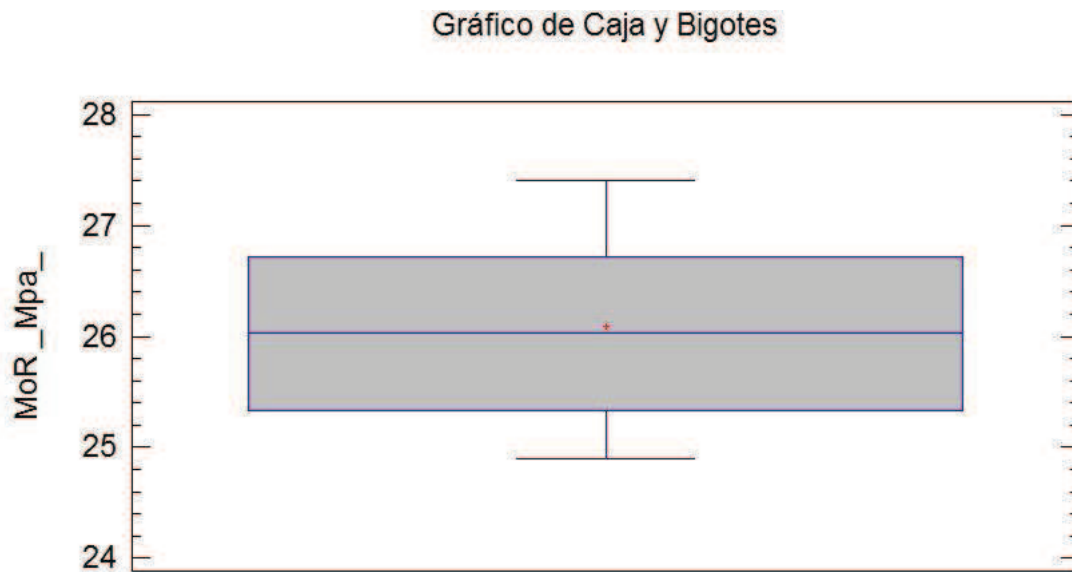


Figura 26 – Gráfico de caja y bigotes para la variable MOR en las probetas Testigo

Otros gráficos que nos permiten comprobar la normalidad de las variables son los gráficos de probabilidad normal. A continuación se muestran los gráficos de probabilidad normal de las 3 variables estudiadas para las probetas Testigo:

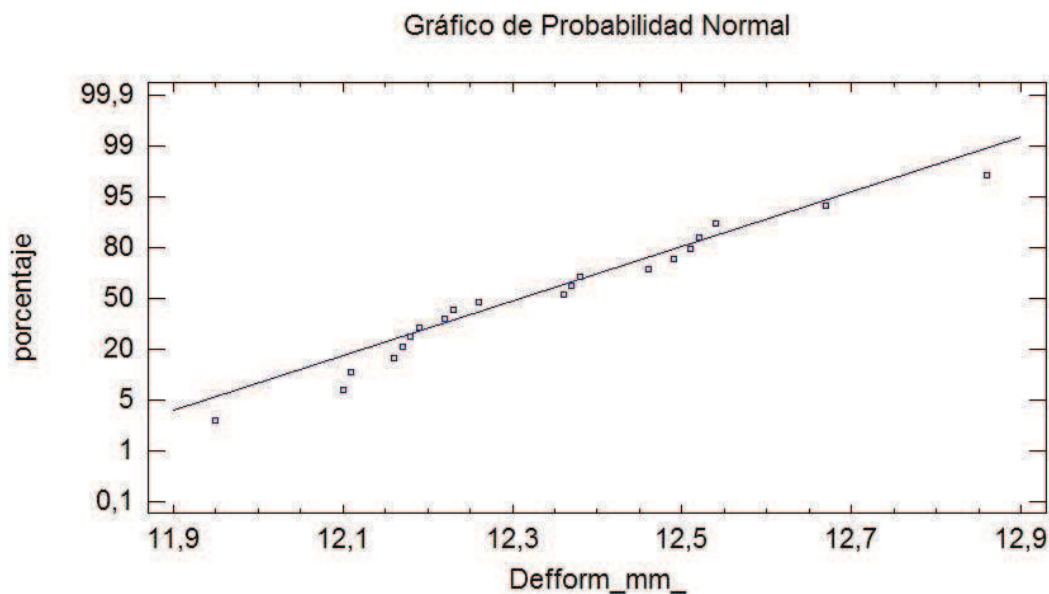


Figura 27 – Gráfico de probabilidad normal para la variable deformación en las probetas Testigo

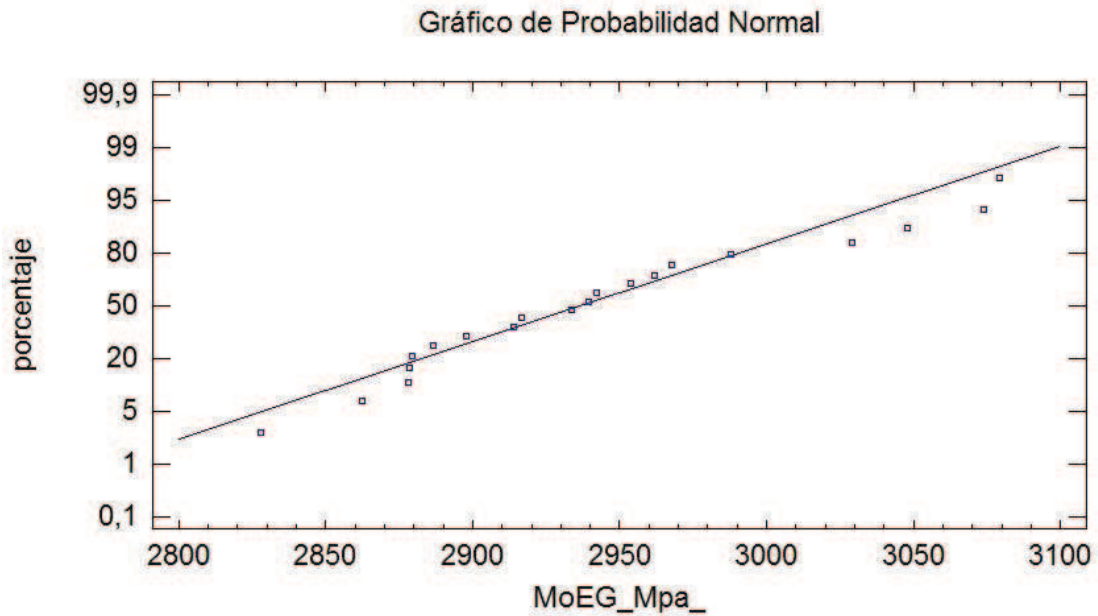


Figura 28 – Gráfico de probabilidad normal para la variable MOEG en las probetas Testigo

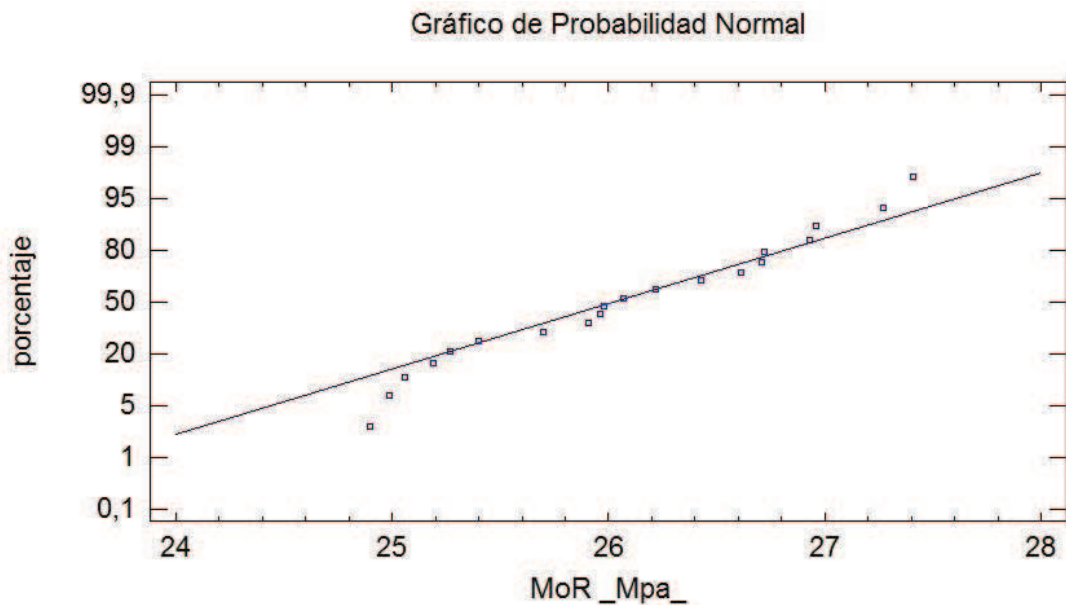


Figura 29 – Gráfico de probabilidad normal para la variable MOR en las probetas Testigo

Además de los gráficos caja-bigotes y de los gráficos de probabilidad normal se realizan dos test estadísticos para saber si los datos pueden modelarse adecuadamente con una distribución normal.

Tabla 7 – Pruebas de normalidad para variables deformación, MOEG y MOR (Testigo)

Prueba	Estadístico Deformación	Valor-P Deformación	Estadístico MOEG	Valor-P MOEG	Estadístico MOR	Valor-P MOR
Chi-Cuadrado	11,200	0,342	8,600	0,570	8,600	0,570
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,963	0,616	0,943	0,288	0,952	0,409

Con los datos obtenidos podemos concluir que debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que las variables deformación, MOEG y MOR en probetas Testigo provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

Atendiendo a todas las pruebas anteriores para determinar la normalidad de las variables deformación, MOEG y MOR en las probetas Testigo podemos concluir de estos análisis que las 3 variables pueden modelarse adecuadamente con una distribución normal para las probetas Testigo.

5.2.3. Análisis descriptivo de las variables deformación, MOEG y MOR en probetas A

El resumen de las principales variables estadísticas para las variables deformación, MOEG y MOR en las probetas A se muestra a continuación:

Tabla 8 – Resumen estadístico para variables deformación, MOEG y MOR (A)

Nº datos: 20	Deformación (mm) A	MOEG (MPa) A	MOR (MPa) A
Media	9,179	4038,630	37,707
Coefficiente de Variación	2,528%	2,383%	2,512%
Mínimo	8,810	3824,600	35,570
Máximo	9,620	4172,800	39,560
Rango	0,810	348,200	3,990
Sesgo Estandarizado	0,546	-0,809	-0,653
Curtosis Estandarizada	-0,913	-0,399	0,536

Al igual que en las probetas Testigo en este caso el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal y el valor de Curtosis estandarizada también se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

A continuación se exponen los gráficos de caja y bigotes para las 3 variables estudiadas para las probetas A:

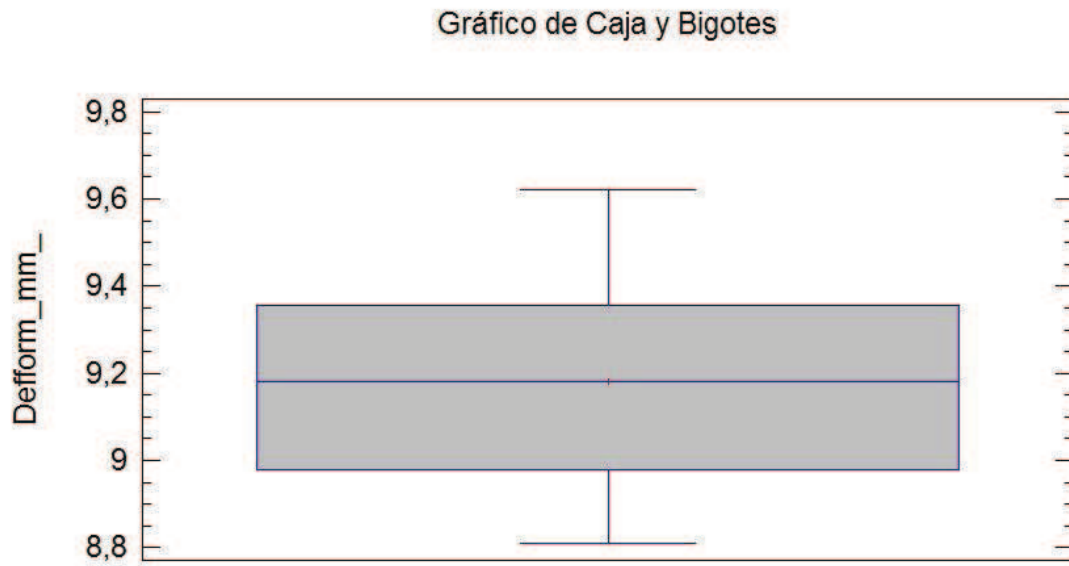


Figura 30 – Gráfico de caja y bigotes para la variable deformación en las probetas A

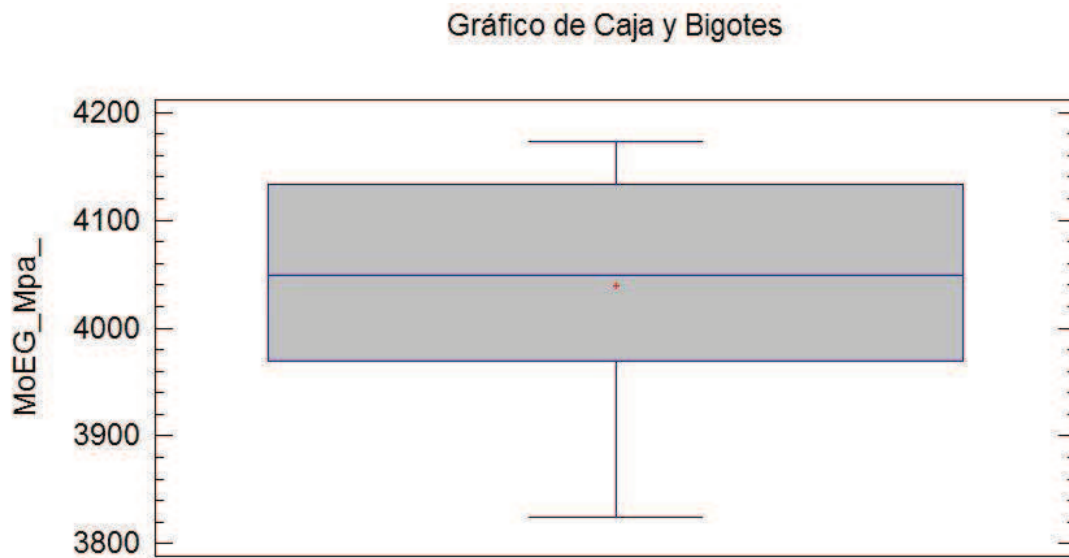


Figura 31 – Gráfico de caja y bigotes para la variable MOEG en las probetas A

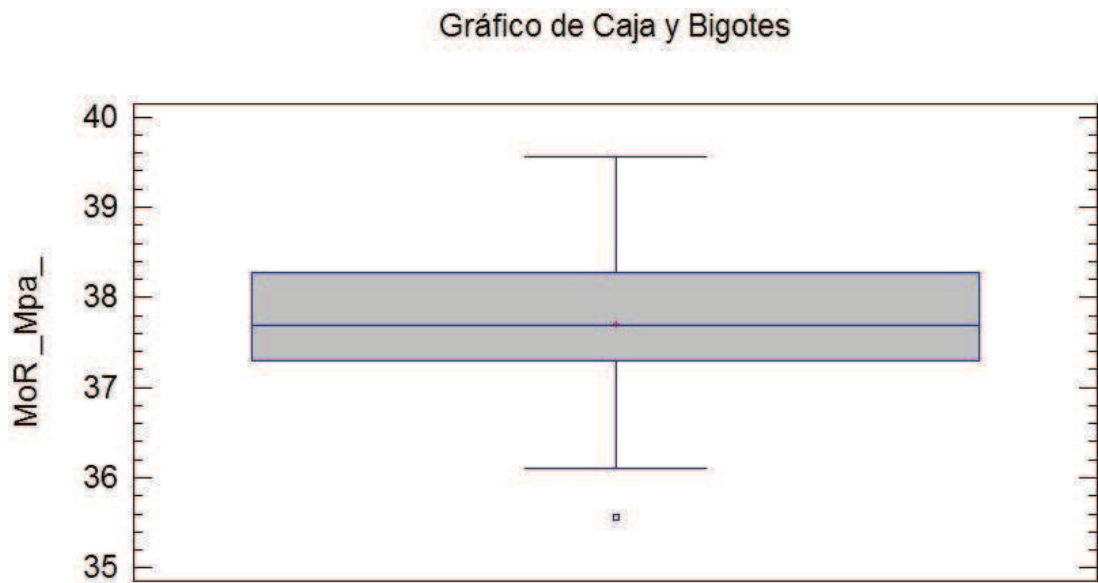


Figura 32 – Gráfico de caja y bigotes para la variable MOR en las probetas A

A continuación se muestran los gráficos de probabilidad normal de las 3 variables estudiadas para las probetas A:

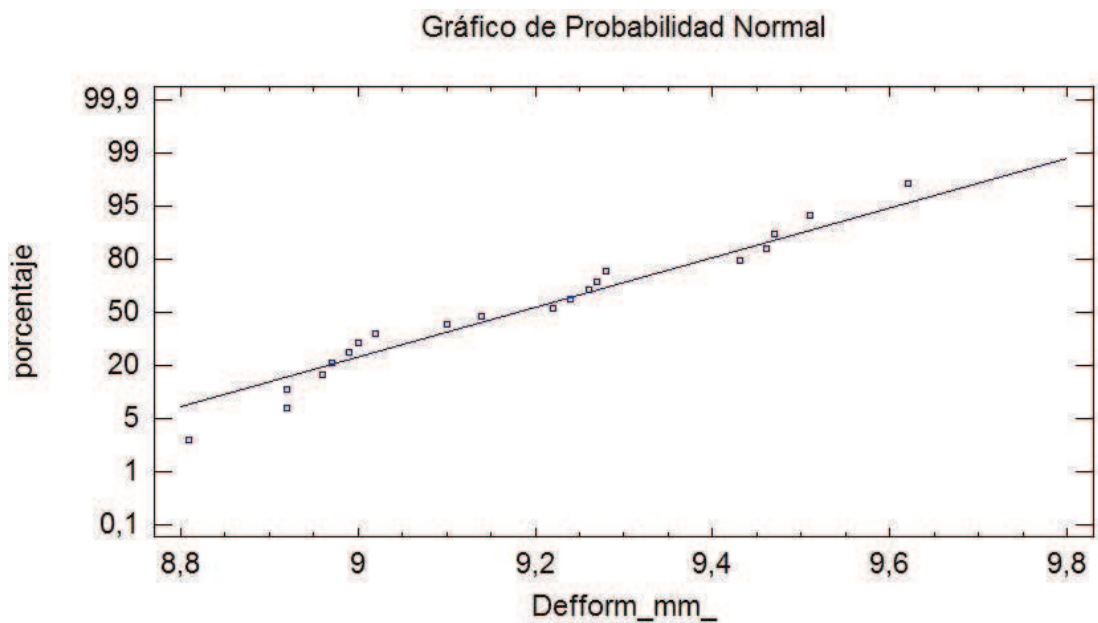


Figura 33 – Gráfico de probabilidad normal para la variable deformación en las probetas A

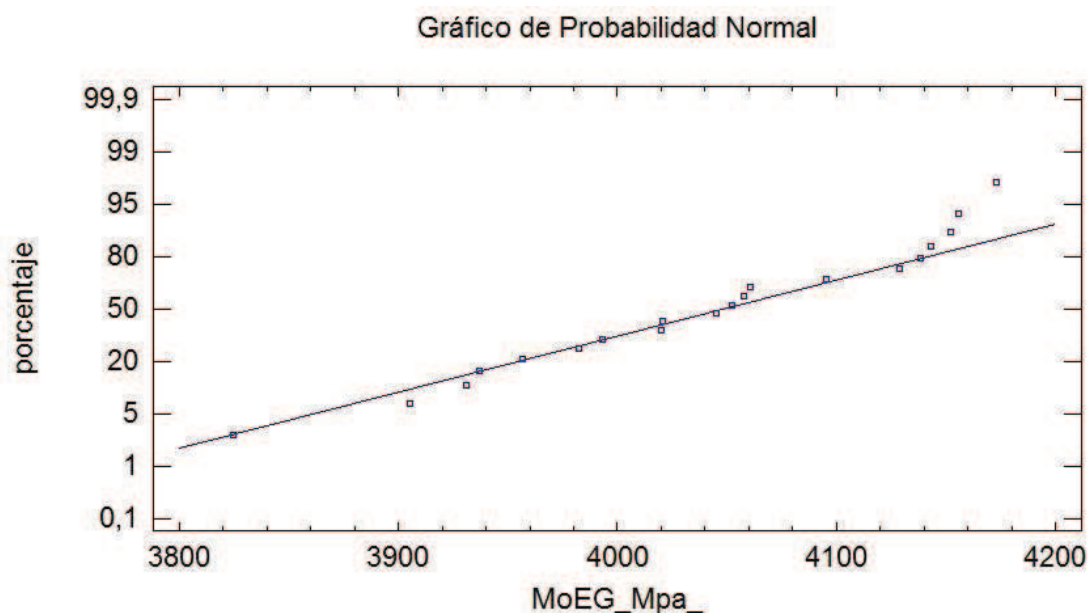


Figura 34 – Gráfico de probabilidad normal para la variable MOEG en las probetas A

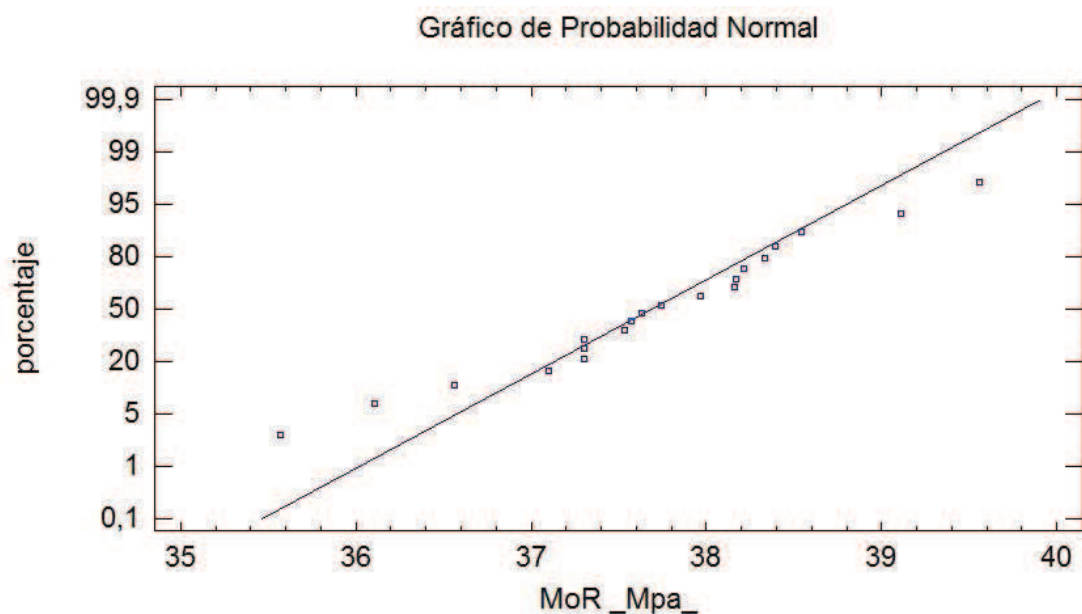


Figura 35 – Gráfico de probabilidad normal para la variable MOR en las probetas A

Al igual que en las probetas Testigo para corroborar la normalidad de los valores de las variables deformación, MOEG y MOR en las probetas A aplicamos las pruebas de normalidad Chi-cuadrado y Estadístico W. Los datos obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 9 – Pruebas de normalidad para variables deformación, MOEG y MOR (A)

Prueba	Estadístico Deformación	Valor-P Deformación	Estadístico MOEG	Valor-P MOEG	Estadístico MOR	Valor-P MOR
Chi-Cuadrado	15,100	0,128	15,100	0,128	7,300	0,696
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,948	0,362	0,954	0,451	0,974	0,821

Observando la tabla podemos concluir que debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que las variables deformación, MOEG y MOR en probetas A proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Atendiendo a todas las pruebas anteriores para determinar la normalidad de las variables deformación, MOEG y MOR en las probetas A podemos concluir de estos análisis que las 3 variables pueden modelarse adecuadamente con una distribución normal para las probetas A.

5.2.4. Análisis descriptivo de las variables deformación, MOEG y MOR en probetas B

Para las probetas B se resumen las principales variables estadísticas para las variables deformación, MOEG y MOR

Tabla 10 – Resumen estadístico para variables deformación, MOEG y MOR (B)

Nº datos: 20	Deformación (mm) B	MOEG (MPa) B	MOR (MPa) B
Media	7,698	4784,370	45,926
Coefficiente de Variación	2,715%	3,275%	4,202%
Mínimo	7,280	4504	41,760
Máximo	8,080	5061,700	48,560
Rango	0,800	557,700	6,800
Sesgo Estandarizado	-0,440	0,460	-0,793
Curtosis Estandarizada	-0,067	-0,736	-0,553

En este caso al igual que en las probetas Testigo y A el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal y el valor de Curtosis estandarizada también se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal (ambos tienen valores entre -2 y 2).

A continuación se exponen los gráficos de caja y bigotes para las 3 variables estudiadas para las probetas B:

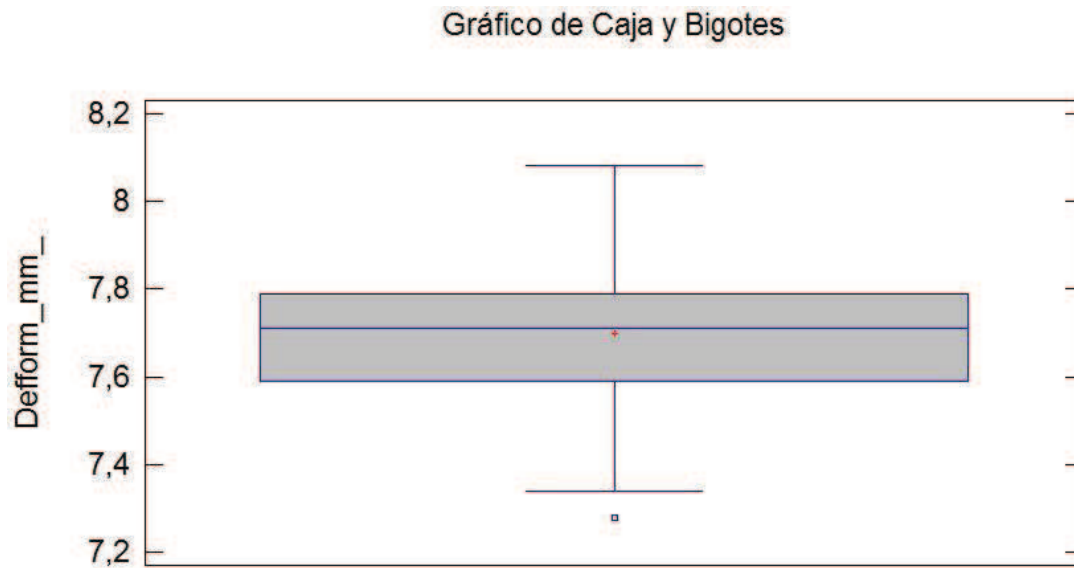


Figura 36 – Gráfico de caja y bigotes para la variable deformación en las probetas B

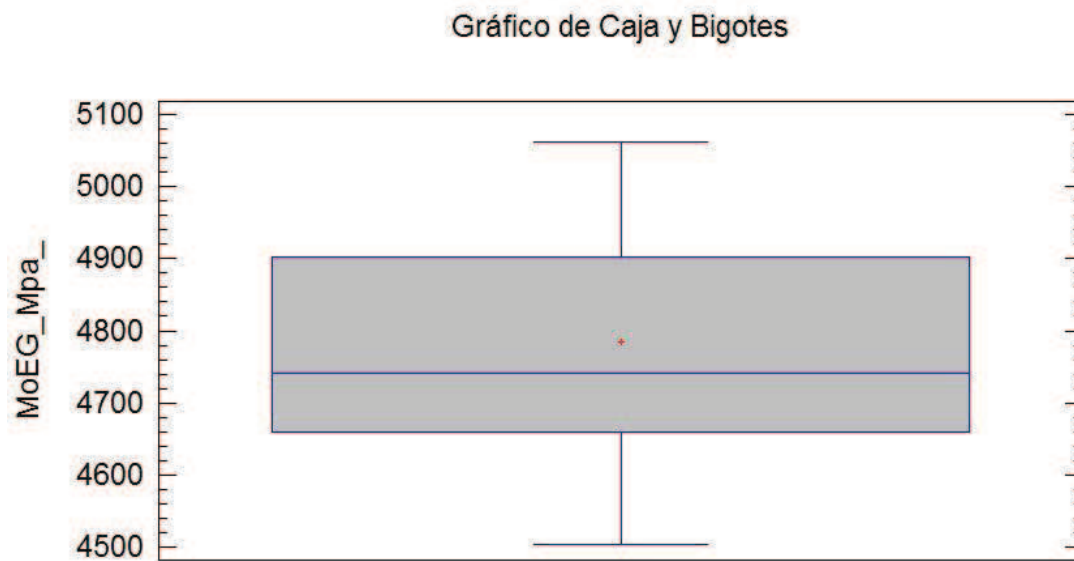


Figura 37 – Gráfico de caja y bigotes para la variable MOEG en las probetas B

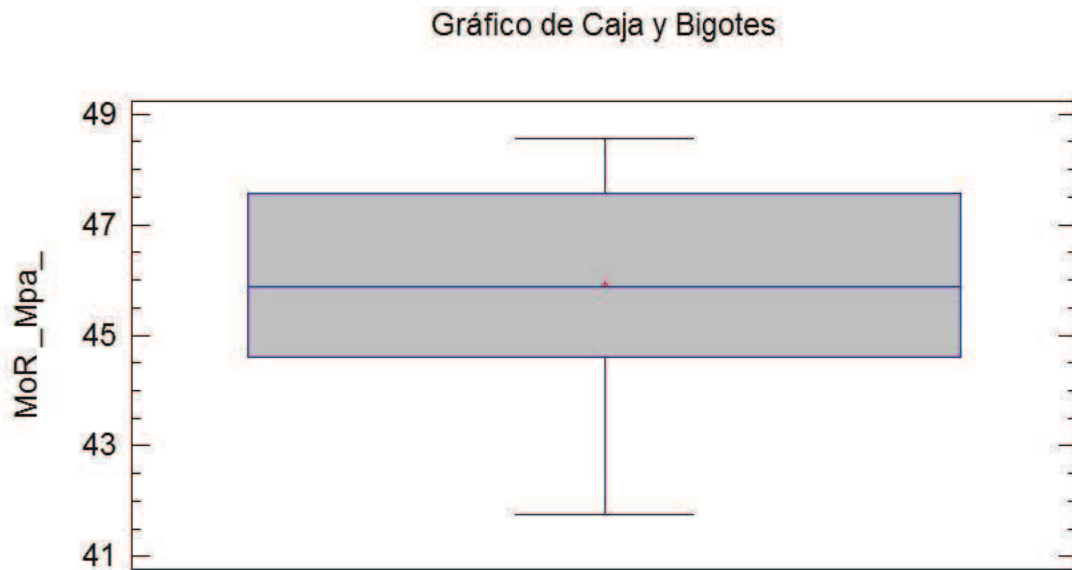


Figura 38 – Gráfico de caja y bigotes para la variable MOR en las probetas B

Seguidamente se muestran los gráficos de probabilidad normal de las 3 variables estudiadas para las probetas B:

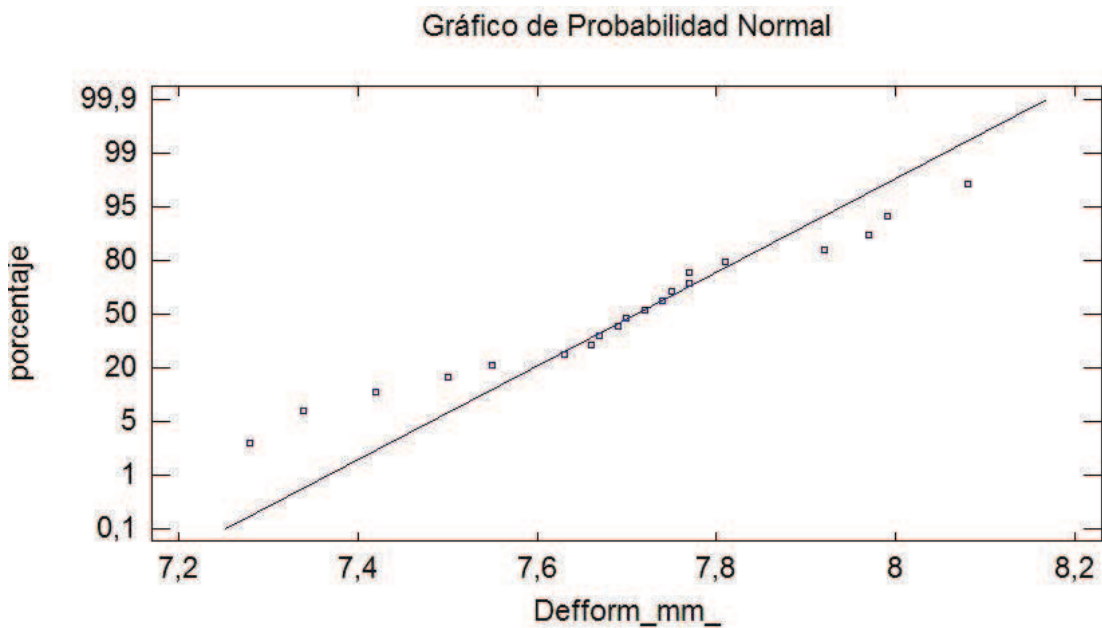


Figura 39 – Gráfico de probabilidad normal para la variable deformación en las probetas B

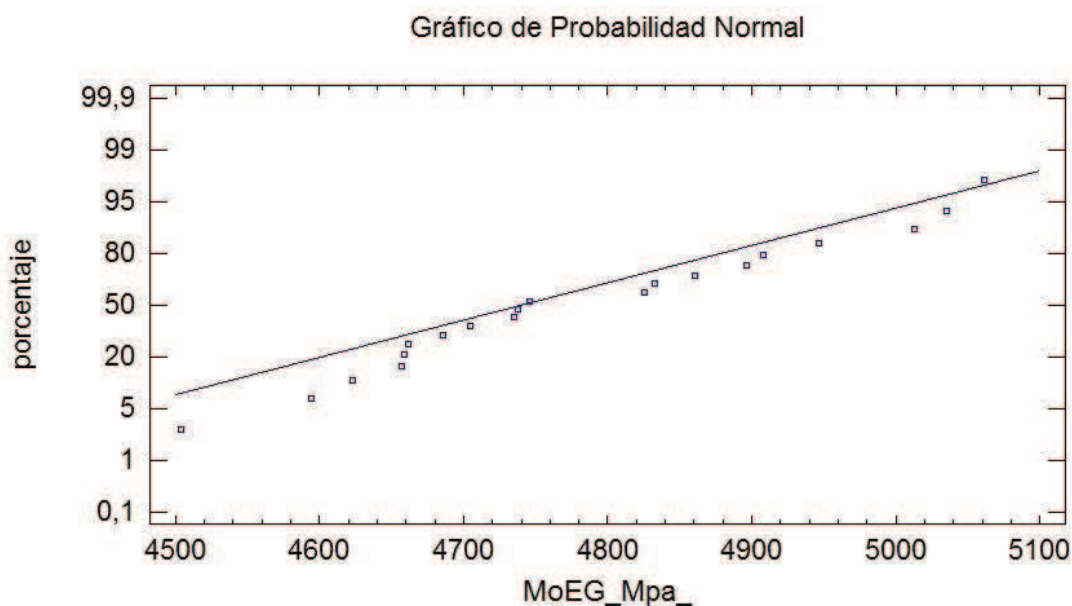


Figura 40 – Gráfico de probabilidad normal para la variable MOEG en las probetas B

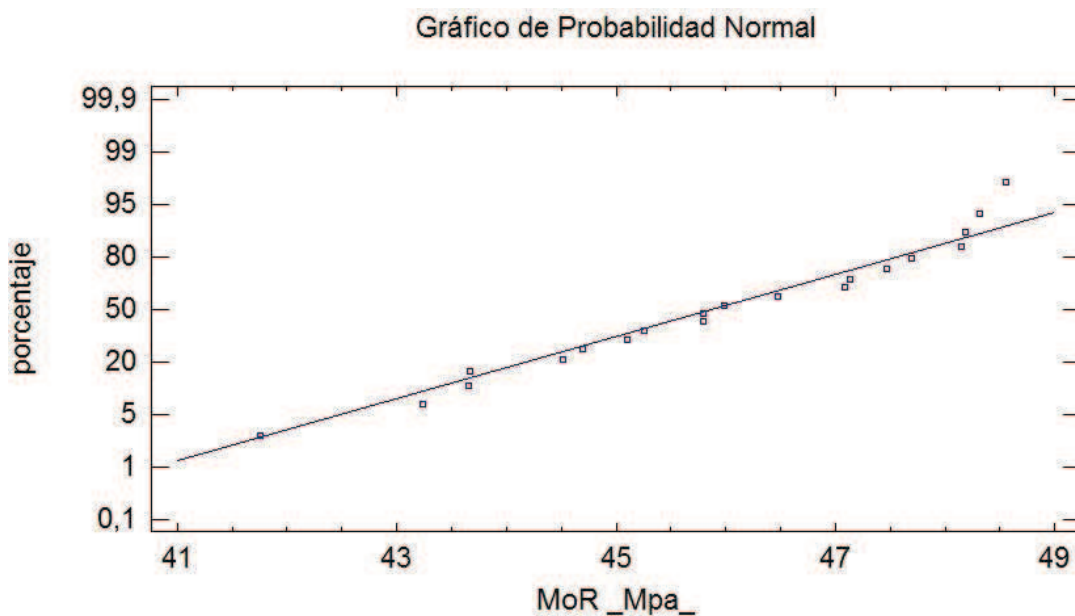


Figura 41 – Gráfico de probabilidad normal para la variable MOR en las probetas B

Como en los 2 casos anteriores para corroborar la normalidad de los valores de las variables deformación, MOEG y MOR en las probetas B aplicamos las pruebas de normalidad Chi-cuadrado y Estadístico W. Los datos obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 11 – Pruebas de normalidad para variables deformación, MOEG y MOR (B)

Prueba	Estadístico Deformación	Valor-P Deformación	Estadístico MOEG	Valor-P MOEG	Estadístico MOR	Valor-P MOR
Chi-Cuadrado	6	0,815	6	0,815	13,800	0,182
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,969	0,738	0,962	0,595	0,953	0,433

Al igual que en los casos anteriores podemos concluir que debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05 para las 3 variables no se puede rechazar la idea de que las variables deformación, MOEG y MOR en probetas B provengan de una distribución normal con 95% de confianza.

En base a todas las pruebas anteriores para determinar la normalidad de las 3 variables estudiadas en las probetas B podemos concluir de estos análisis que las 3 variables pueden modelarse adecuadamente con una distribución normal para las probetas B.

5.3. Estadística comparativa de las variables estudiadas

Para realizar un análisis comparativo de las 3 variables estudiadas en el presente TFM utilizamos el procedimiento ANOVA Simple del programa estadístico *StatGraphics Centurion XV*.

El procedimiento ANOVA realiza un análisis de la varianza para cada una de las variables estudiadas. Para poder aplicar el procedimiento ANOVA la variable analizada tiene que cumplir 3 condiciones: normalidad, independencia y homocedasticidad.

5.3.1. Análisis comparativo de la variable deformación para probetas Testigo, A y B

En primer lugar se realiza el análisis comparativo de la variable deformación entre las 3 poblaciones a comparar (Testigo, A y B). Para realizar el análisis comparativo utilizo el procedimiento ANOVA. Para poder aplicar ANOVA necesito que la variable a analizar cumpla 3 condiciones:

- Normalidad: en el análisis descriptivo de la variable deformación se ha demostrado que la variable se ajusta a una distribución normal.

- Independencia: los valores obtenidos en los ensayos de la variable deformación son independientes entre los diferentes tipos de probetas ensayadas (Testigo, A y B) y dentro de cada tipo.

- Homocedasticidad: esta condición evalúa si existen diferencias significativas entre las varianzas de las poblaciones (Testigo, A y B) para la variable de estudio (En este caso deformación). Para comprobar la condición de homocedasticidad utilizamos el test de Levene's

Tabla 12 – Verificación de la varianza de la variable deformación para las poblaciones Testigo, A y B mediante Test de Levene's:

	Prueba	Valor-P
Levene's	0,576	0,565

Puesto que el P-valor obtenido es mayor que 0,05 podemos concluir que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de la variable estudiada para las 3 poblaciones con un nivel de 95 % de confianza.

Para ver las diferencias estadísticamente significativas entre las medias de la variable deformación para los 3 tipos estudiados (Testigo, A y B) utilizo la tabla ANOVA la cual descompone la varianza de la variable estudiada en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos.

Tabla 13 – Tabla ANOVA para la variable deformación por tipo (Testigo, A y B)

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	224,514	2	112,257	2302,120	0,000
Intra grupos	2,779	57	0,048		
Total (Corr.)	227,294	59			

Observando la tabla ANOVA podemos concluir que debido a que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05 existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la variable deformación entre un nivel de tipo y otro (Testigo, A y B) con un nivel del 95,0% de confianza aunque no sabemos entre que medias concretamente existen diferencias significativas. Para determinar los valores medios que son significativamente diferentes de otros, utilizamos la Prueba de Rango Múltiple. Dicha prueba aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar que medias son significativamente diferentes unas de otras. Los resultados de la Prueba de Rango Múltiple para la variable deformación se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla 14 – Prueba de rango múltiple para la variable deformación por Tipo (Testigo, A y B)

Tipo	Casos	Media	Grupos Homogéneos
B	20	7,698	X
A	20	9,179	X
T	20	12,336	X

Observando las medias de la variable deformación para los 3 tipos ensayados (Testigo, A y B) podemos concluir que para la variable deformación existen diferencias

estadísticamente significativas entre los 3 tipos estudiados con un nivel de 95 % de confianza lo cual queda reflejado en el siguiente gráfico de medias:

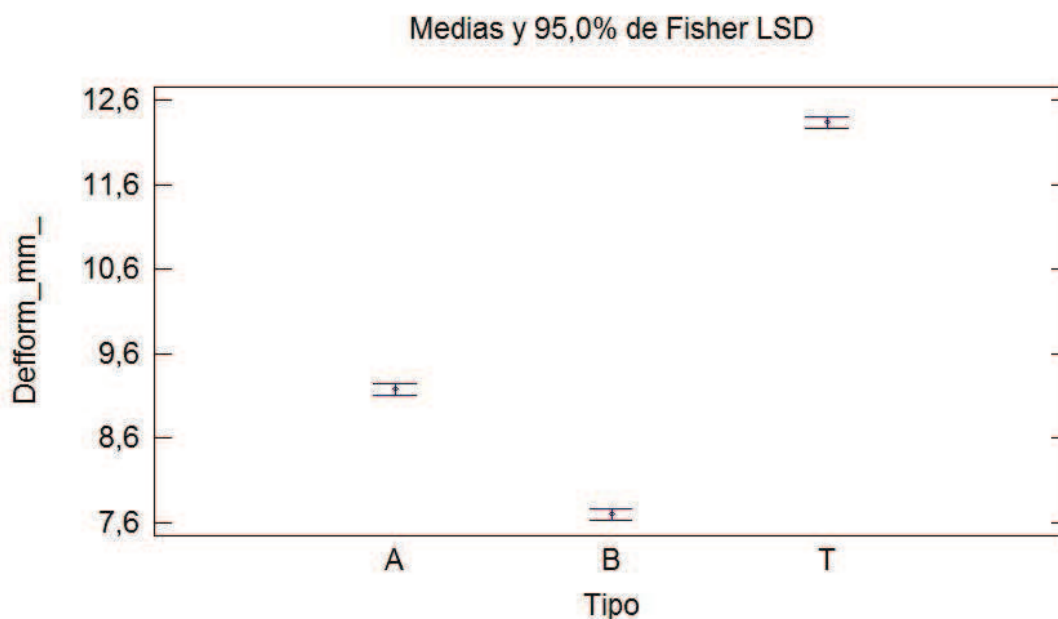


Figura 42 – Gráfico de medias para la variable deformación y tipo (Testigo, A y B)

5.3.2. Análisis comparativo de la variable MOEG para probetas Testigo, A y B

Como ya hemos explicado realizaremos el análisis comparativo de las variables mediante el análisis de la varianza (ANOVA), para poder aplicarlo necesito que la variable cumpla 3 condiciones:

- Normalidad: en el análisis descriptivo de la variable MOEG se ha demostrado que la variable se ajusta a una distribución normal.
- Independencia: los valores obtenidos de la variables MOEG son independientes entre los diferentes tipos de probetas ensayadas (Testigo, A y B) y dentro de cada tipo.
- Homocedasticidad: para que se de esta condición comprobamos si existen diferencias significativas entre las varianzas de las poblaciones (Testigo, A y B) para la variable de estudio (En este caso MOEG). Para comprobar la condición de homocedasticidad utilizamos el test de Levene's:

Tabla 15 – Verificación de la varianza de la variable MOEG para las poblaciones Testigo, A y B mediante Test de Levene´s

	Prueba	Valor-P
Levene´s	5,926	0,004

Puesto que el P-valor obtenido es menor que 0,05 podemos afirmar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de la variable estudiada para las 3 poblaciones con un nivel de 95 % de confianza. Esta diferencia me impide aplicar ANOVA para realizar el análisis comparativo de la variable MOEG para las poblaciones Testigo, A y B.

La alternativa a la no aplicación de ANOVA es utilizar la prueba de Kruskal-Wallis. Esta prueba evalúa la hipótesis de que las medianas de las variables estudiadas dentro de cada uno de los 3 poblaciones (Testigo, A y B) son iguales. Aplicando la prueba de Kruskal-Wallis a la variable MOEG para las 3 poblaciones obtenemos los siguientes datos:

Tabla 16 - Prueba de Kruskal-Wallis para variable MOEG por tipo (Testigo, A y B)

Tipo	Tamaño Muestra	Rango Promedio
A	20	30,5
B	20	50,5
T	20	10,5
Estadístico = 52,459 Valor-P = 4,06131E-12		

Observando los resultados obtenidos podemos concluir que puesto que el valor-P obtenido es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de los 3 tipos (Testigo, A y B) para la variable MOEG con un nivel del 95,0% de confianza.

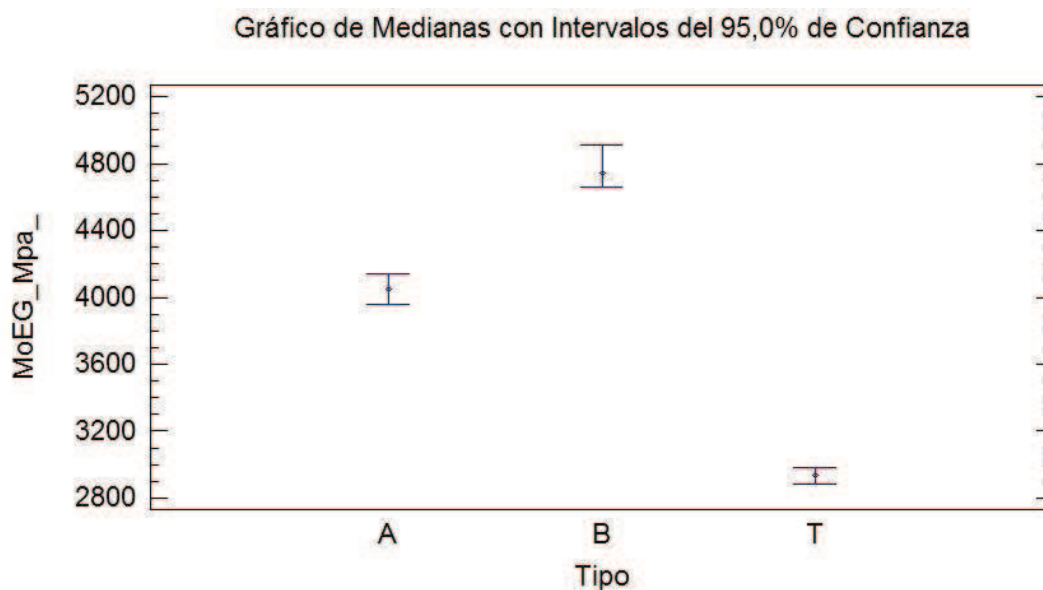


Figura 43 – Gráfico de medianas para la variable MOEG y tipo (Testigo, A y B)

Para corroborar las diferencias existentes para la variable MOEG entre los 3 tipos de poblaciones (Testigo, A y B) utilizo la prueba de rango múltiple. En la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos con la prueba de rango múltiple.

Tabla 17 – Prueba de rango múltiple para la variable MOEG para probetas Testigo, A y B

Tipo	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T	20	2942,890	X
A	20	4038,620	X
B	20	4784,380	X

Como podemos observar en la tabla comprobamos que existen diferencias significativas para la variable MOEG en los 3 tipos de probetas ensayados (Testigo, A y B).

5.3.3. Análisis comparativo de la variable MOR para probetas Testigo, A y B

Al igual que en los dos casos anteriores para realizar el análisis comparativo de la variable MOR utilizo el procedimiento ANOVA. Para poder aplicar ANOVA necesito que la variable a analizar cumpla 3 condiciones:

- Normalidad: el análisis descriptivo de la variable MOR demuestra que la variable se ajusta a una distribución normal.

- Independencia: los valores obtenidos en los ensayos de la variable MOR son independientes entre los diferentes tipos de probetas ensayadas (Testigo, A y B) y dentro de cada tipo.

- Homocedasticidad: al igual que en los 2 casos anteriores tenemos que evaluar si existen diferencias significativas entre las varianzas de las poblaciones (Testigo, A y B) para la variable MOR. Para comprobar esta condición utilizamos el test de Levene's:

Tabla 18 – Verificación de la varianza de la variable deformación para las poblaciones Testigo, A y B mediante Test de Levene's

	Prueba	Valor-P
Levene's	9,862	0,0002

Observamos que al igual que en el caso de la variable MOEG en este caso el P-valor obtenido es menor que 0,05. Podemos afirmar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de la variable MOR para las 3 poblaciones con un nivel de 95 % de confianza. Por tanto no es posible aplicar el procedimiento ANOVA para realizar el análisis comparativo de la variable MOR para las poblaciones Testigo, A y B.

Para realizar el análisis comparativo de la variable MOR al igual que en el caso anterior utilizo la prueba de Kruskal-Wallis. Aplicando la prueba de Kruskal-Wallis a la variable MOR para las 3 poblaciones obtenemos los siguientes datos:

Tabla 19 - Prueba de Kruskal-Wallis para variable MOR por tipo (Testigo, A y B)

Tipo	Tamaño Muestra	Rango Promedio
A	20	30,5
B	20	50,5
T	20	10,5
Estadístico = 52,4663 Valor-P = 4,04654E-12		

Con los resultados obtenidos podemos concluir que puesto que el valor-P obtenido es menor que 0,05 existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de los 3 tipos (Testigo, A y B) para la variable MOR con un nivel del 95,0% de confianza.

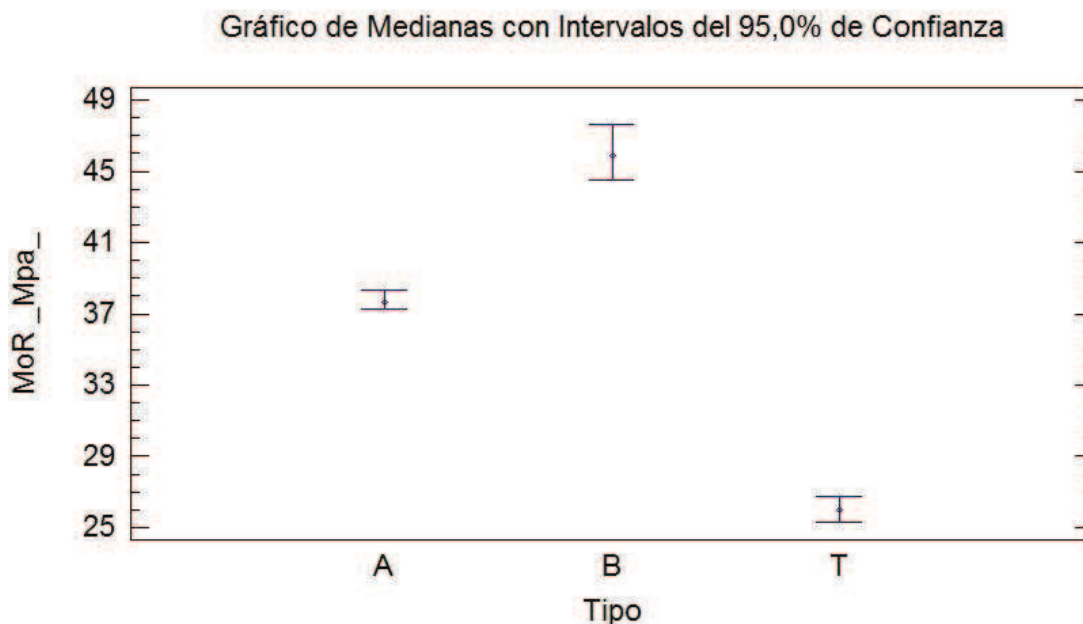


Figura 44 – Gráfico de medianas para la variable MOR y tipo (Testigo, A y B)

Al igual que en los casos anteriores para comprobar las diferencias existentes para la variable MOR entre los 3 tipos de poblaciones (Testigo, A y B) utilizo la prueba de rango múltiple. En la tabla 20 se muestran los resultados obtenidos con la prueba de rango múltiple.

Tabla 20 – Prueba de rango múltiple para la variable MOR para probetas Testigo, A y B

Tipo	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T	20	26,084	X
A	20	37,707	X
B	20	45,926	X

Observando la tabla comprobamos que existen diferencias significativas para la variable MOR en los 3 tipos de probetas ensayados (Testigo, A y B).

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

A continuación se exponen las conclusiones obtenidas a partir de los resultados obtenidos una vez finalizado el ensayo de los 3 tipos de probetas (Testigo, A y B) y el posterior tratamiento estadístico de los datos obtenidos en los ensayos (Deformación, MOEG y MOR).

En cuanto a los objetivos que se plateaban con la realización del presente TFM las conclusiones obtenidas a partir de los ensayos serían las siguientes:

Para cumplir los objetivos del presente TFM se han determinado diferentes propiedades elastomecánicas (deformación, MOEG y MOR) de los 3 tipos de tableros de fibras ensayados (Testigo, A y B) y se ha realizado una comparación entre los mismos.

De los resultados obtenidos tras el tratamiento estadístico de los datos obtenidos en el ensayo destructivo (Tablas 6, 8 y 10 del apartado Resultados y Discusión) se concluye que:

Para la variable deformación la media de la deformación en las probetas testigo ha sido de 12,336 mm, para las probetas A 9,179 mm y para las probetas B 7,698 mm. Estos datos obtenidos reflejan que el refuerzo de fibra de vidrio en los tableros de fibras reduce la deformación de las probetas. Esto permite que sea posible aplicar una fuerza mayor sobre las probetas sin que la deformación producida sea tan elevada.

El valor del MOEG obtenido para las probetas testigo es de 2942,890 MPa, para las probetas A el valor del MOEG ha sido de 4038,630 MPa y para las probetas B se ha obtenido un valor de 4784,370 MPa. Los resultados reflejan un incremento considerable del MOEG debido al refuerzo de la fibra de vidrio ya que la resistencia de la fibra permite aplicar un esfuerzo mayor sobre las probetas y la deformación producida al aplicar dicho esfuerzo no es tan elevada como en el caso de no aplicar refuerzo de fibra de vidrio en los tableros.

En cuanto al MOR, el valor obtenido para las probetas testigo ha sido de 26,084 MPa, para las probetas A se ha obtenido un valor de 37,707 MPa y para las probetas B se ha obtenido un MOR de 45,926 MPa. Como podemos observar el valor del MOR también es más elevado ya que la resistencia que ofrece la fibra de vidrio implica que sea necesario aplicar un mayor esfuerzo para provocar la rotura de la pieza ya que el momento máximo soportado por las probetas es mayor que en el caso de no utilizar refuerzo de fibra de vidrio.

De los resultados obtenidos del ensayo de densidad y humedad aplicados se deduce que la densidad de los tableros de fibras aumenta con el refuerzo de la fibra de vidrio y la humedad de los tableros es muy baja debido a que el proceso de fabricación de los tableros de fibras reduce las propiedades higroscópicas de este material ya que al comprimir las fibras para fabricar el tablero éstas pierden capacidad de retención de agua.

Con los resultados obtenidos podemos afirmar que con la adición de fibra de vidrio en los tableros de fibras se mejoran considerablemente las propiedades elastomecánicas de dichos tableros lo cual cumple con los objetivos marcados en el presente TFM.

BIBLIOGRAFÍA

Alumno: David López Sotelo
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
Titulación de: Máster Universitario en Ingeniería de Montes

7. BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas:

AITIM (2011). Generalidades de la madera. AITIM. Madrid.

AITIM (1971). Densidad de las maderas más comunes, pp.2. AITIM. Madrid.

ARGÜELLES, R.; ARRIAGA, F. (2000). Estructuras de madera, bases de cálculo. AITIM.

ARRIAGA, F.; PERAZA, F.; ESTEBAN, M.; BOBADILLA y GARCÍA F. (2002). Intervención en estructuras de madera. pp 51. AITIM. Madrid.

BOSTRÖM, L. (1999). First Rilem Symposium on Timber Engineering. Edited By L. Boström, pp 838.

CASADO SANZ, M. (1997). Tecnología de las industrias forestales Tomo 1. Servicio de Publicaciones ETSIIAA. Palencia.

CASADO SANZ, M.; ACUÑA RELLO, L. (2000). La madera en la construcción. Instituto Tecnológico Agrario y Agroalimentario. Palencia.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J. L. et al. (2000). La madera de la construcción, Capítulo 1 "Propiedades elastomecánicas de la madera", pp. 5-45. Instituto Tecnológico Agrario y Agroalimentario. Palencia.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J. L.; DIEZ BARRA, M.R. (2000). Tableros de fibras de densidad media (MDF). Deformación a largo plazo por carga constante y condiciones alternantes de humedad. Revista AITIM 203 pp. 66-68.

GARCÍA CASCO, A. (2012). www.ugr.es/~agcasco/personal/restauración/teoría/tema05. Universidad de Granada.

HUGON, A.; SERRE, M. et al. (1983). Enciclopedia de la construcción: Técnicas de construcción: Volumen 3. Editores Técnicos Asociados, S.A. pp. 3120-3125.

ROWLANDS, R.E.; VAN DEWEGHE, R.P.; LAUFENBERG, T.L.; KRUEGER, G.P. (1984). Fiber reinforced Wood composites.

VIGNOTE PEÑA, S.; MARTÍNEZ ROJAS, S. (2005). Tecnología de la madera. Ediciones Mundi-Prensa S.A.

VIGNOTE PEÑA, S. (2014). Productos derivados de la madera. Universidad Politécnica de Madrid.

Normativa:

UNE-EN 408:2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

UNE-EN 336:2014. Madera estructural. Medidas y tolerancias.

UNE-EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes.

UNE-EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

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

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

ANEJOS

ANEJOS

Resultados obtenidos tras ensayo destructivo

Tabla 21 – Resultados obtenidos tras ensayo destructivo en probetas testigo

Tipo	Longitud	Cara	Canto	Tiempo (s)	Fuerza Rotura (Kn)	MOR (MPa)	Fuerza Def (Kn)	Deformación (mm)	MOEG (MPa)
T	120	60	40	208	3,84	26,96	1,5	12,52	2862,3
T	120	60	40	214	3,79	26,61	1,5	12,51	2827,7
T	120	60	40	205	3,74	26,22	1,5	12,22	2953,9
T	120	60	40	200	3,69	25,91	1,5	12,26	2877,9
T	120	60	40	209	3,84	26,93	1,5	12,17	2961,8
T	120	60	40	190	3,71	25,98	1,5	12,1	2967,8
T	120	60	40	208	3,81	26,71	1,5	12,36	2879,2
T	120	60	40	196	3,59	25,19	1,5	12,67	2886,7
T	120	60	40	193	3,57	25,06	1,5	12,54	2897,7
T	120	60	40	220	3,77	26,43	1,5	12,86	2878,5
T	120	60	40	229	3,89	27,27	1,5	12,49	2916,4
T	120	60	40	113	3,72	26,07	1,5	12,16	3074,1
T	120	60	40	143	3,6	25,27	1,5	12,46	2942
T	120	60	40	188	3,67	25,7	1,5	12,19	3079,5
T	120	60	40	168	3,91	27,41	1,5	12,23	3048
T	120	60	40	191	3,55	24,9	1,5	12,18	2933,8
T	120	60	40	198	3,81	26,72	1,5	11,95	3029,2
T	120	60	40	200	3,7	25,96	1,5	12,38	2939,6
T	120	60	40	184	3,56	24,99	1,5	12,11	2987,7
T	120	60	40	197	3,62	25,4	1,5	12,37	2914,1

Tabla 22 – Resultados obtenidos tras ensayo destructivo en probetas A

Tipo	Longitud	Cara	Canto	Tiempo (s)	Fuerza Rotura (Kn)	MOR (MPa)	Fuerza Def (Kn)	Deformación (mm)	MOEG (MPa)
A	120	60	40	216	5,47	38,39	1,5	9,28	4057,8
A	120	60	40	223	5,41	37,97	1,5	9,26	3993,2
A	120	60	40	225	5,5	38,54	1,5	9,46	4052,1
A	120	60	40	201	5,21	36,56	1,5	8,97	4138,5
A	120	60	40	230	5,58	39,11	1,5	9	4128,9
A	120	60	40	211	5,29	37,1	1,5	9,27	4060,8
A	120	60	40	206	5,32	37,3	1,5	8,92	4020,6
A	120	60	40	207	4,91	37,63	1,5	8,81	4152
A	120	60	40	216	4,97	37,74	1,5	9,1	4045,4
A	120	60	40	222	5,47	38,33	1,5	8,99	4095,4
A	120	60	40	217	5,44	38,17	1,5	9,02	4143,2

Tabla 22 (Cont.)– Resultados obtenidos tras ensayo destructivo en probetas A

Tipo	Longitud	Cara	Canto	Tiempo (s)	Fuerza Rotura (Kn)	MOR (MPa)	Fuerza Def (Kn)	Deformación (mm)	MOEG (MPa)
A	120	60	40	208	5,32	37,3	1,5	8,96	4172,8
A	120	60	40	219	5,44	38,16	1,5	9,43	3956,4
A	120	60	40	220	5,64	39,56	1,5	8,92	4155,4
A	120	60	40	200	5,07	35,57	1,5	9,14	3936,7
A	120	60	40	216	5,35	37,53	1,5	9,24	3982,3
A	120	60	40	219	5,29	37,3	1,5	9,47	3931
A	120	60	40	219	5,45	38,21	1,5	9,22	4019,9
A	120	60	40	208	5,15	36,11	1,5	9,62	3824,6
A	120	60	40	220	5,36	37,57	1,5	9,51	3905,5

Tabla 23 – Resultados obtenidos tras ensayo destructivo en probetas B

Tipo	Longitud	Cara	Canto	Tiempo (s)	Fuerza Rotura (Kn)	MOR (MPa)	Fuerza Def (Kn)	Deformación (mm)	MOEG (MPa)
B	120	60	40	206	6,45	45,26	1,5	7,69	4661,1
B	120	60	40	216	6,72	47,13	1,5	7,77	4896,4
B	120	60	40	214	6,37	44,7	1,5	7,74	4908,4
B	120	60	40	220	6,8	47,69	1,5	7,34	4737,3
B	120	60	40	211	6,77	47,47	1,5	7,5	4946,8
B	120	60	40	206	6,53	45,79	1,5	7,63	5035,4
B	120	60	40	218	6,7	48,56	1,5	7,42	5061,7
B	120	60	40	195	6,23	43,67	1,5	7,28	5013,2
B	120	60	40	211	6,56	45,98	1,5	7,55	4704,6
B	120	60	40	225	6,89	48,32	1,5	7,72	4734,7
B	120	60	40	218	6,63	46,48	1,5	7,92	4657
B	120	60	40	218	6,89	48,18	1,5	7,7	4860,7
B	120	60	40	213	6,71	47,09	1,5	7,66	4832,5
B	120	60	40	197	6,22	43,65	1,5	7,75	4685,8
B	120	60	40	209	6,53	45,79	1,5	7,81	4745,9
B	120	60	40	217	6,86	48,15	1,5	7,67	4825,6
B	120	60	40	204	6,35	44,52	1,5	7,77	4659,2
B	120	60	40	192	5,95	41,76	1,5	7,99	4504
B	120	60	40	199	6,17	43,24	1,5	7,97	4594,2
B	120	60	40	215	6,43	45,1	1,5	8,08	4623

Tabla 24 – Resultados ensayo humedad en selección de 5 probetas de cada tipo (Testigo, A y B)

Tipo	Probeta	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)
T	3-2	110,9	104,1	6,53
T	8-1	113,4	106,6	6,37
T	13-1	115,3	108,5	6,26
T	14-2	113	106,2	6,40
T	20-2	112,1	105,2	6,56
A	A-4	125	117,6	6,29
A	A-9	124,2	117	6,15
A	A-13	124,3	117,7	5,60
A	A-17	122,1	115,8	5,44
A	A-21	122,4	115,7	5,79
B	B-5	129,2	122,6	5,38
B	B-9	127,4	120,7	5,55
B	B-12	131,3	124,3	5,63
B	B-16	130,7	124	5,40
B	B-20	132,2	125,1	5,67

Tabla 25 – Resultados ensayo densidad en selección de 5 probetas de cada tipo (Testigo, A y B)

Tipo	Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Volumen (cm ³)	Peso seco (g)	Densidad (g/cm ³)
T	3-2	6,3	6	3,8	143,64	104,1	0,72
T	8-1	6,25	6	3,8	142,5	106,6	0,75
T	13-1	6,3	6	3,8	143,64	108,5	0,7
T	14-2	6,25	6,1	3,8	144,875	106,2	0,73
T	20-2	6,25	6,1	3,8	144,875	105,2	0,72
A	A-4	6,3	6,1	3,9	149,877	117,6	0,78
A	A-9	6,3	6,1	3,9	149,877	117	0,78
A	A-13	6,3	6,1	3,9	149,877	117,7	0,78
A	A-17	6,3	6,1	3,9	149,877	115,8	0,77
A	A-21	6,3	6	3,9	147,42	115,7	0,78
B	B-5	6,3	6,1	4	153,72	122,6	0,79
B	B-9	6,3	6,05	4	152,46	120,7	0,79
B	B-12	6,3	6,1	4	153,72	124,3	0,80
B	B-16	6,3	6,15	4	154,98	124	0,80
B	B-20	6,4	6,1	4	156,16	125,1	0,80