

UNIVERSIDAD DE CUENCA



Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil

**“Determinación de las propiedades mecánicas de las vigas de
madera laminada como elementos estructurales”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

Autor:

Juan José Galindo Galindo

CI: 0104807706

juanjo_06@hotmail.es

Director:

Ing. Juan Fernando Zalamea León PhD.

CI: 0102059326

Cuenca - Ecuador

26-06-2020

RESUMEN

La madera, a pesar de ser un material que ha servido para la construcción a lo largo de los años, ha perdido cierto protagonismo en las últimas décadas debido a la incertidumbre que se tiene con sus propiedades mecánicas; caso contrario a otros materiales más utilizados en la actualidad como el hormigón armado y el acero. Bajo la tecnología de elementos laminados, el uso de la madera ha resurgido en el sector constructivo, mediante la aplicación de vigas de cualquier longitud, forma y sección que, sumado a la ligereza y resistencia, hacen del material un producto muy versátil en proyectos de ingeniería. Su estudio y aplicación en el ámbito local no es muy común debido al poco conocimiento de dicha tecnología.

El presente proyecto contempla la fabricación y determinación de las propiedades mecánicas de vigas de madera laminada como elementos estructurales en 3 especies forestales del Ecuador de diferentes características. El proyecto tiene como primera meta el diseño de las vigas, es decir, a partir de antecedentes e historia, determinar los implementos necesarios para la fabricación de dichos elementos estructurales, tales como tipo de madera, el encolado para la unión de las láminas o listones y el tipo de prensado para obtener un solo elemento compacto. En la segunda parte, el estudio se centra en la obtención de las propiedades mecánicas tales como flexión, rigidez y deformación de las vigas formadas por láminas continuas y láminas con uniones dentadas. En la etapa final, los datos alcanzados a partir de los ensayos en laboratorio, se comparan para determinar el porcentaje de pérdida en la resistencia de las vigas con uniones dentadas. Finalmente, se analiza la resistencia de los elementos, para contemplar la posibilidad de usar vigas de madera laminada, con menores costos de implementación, en procesos constructivos estructurales.

Palabras Clave: Madera, vigas laminadas encoladas, elementos estructurales, propiedades mecánicas, ensayos de flexión, rigidez, deformación.

ABSTRACT

Timber, despite being a material that has been used for construction over the years, has lost some relevance in recent decades due to uncertainty of its mechanical properties. With the technology of laminated elements, the use of wood has re-emerged in the structure processes, since the implementation of beams of any length, shape and section. Based on its lightness and resistance, all the characteristics make it a very versatile material for engineering. It's study and application in our country is not common due the lack of knowledge and technology.

This project focuses on the manufacture and determination of mechanical properties of glue laminated timber beams for structural purposes in 3 different Ecuadorian forest classes. The project's first objective is the determination and manufacture methods of beams based on current literature. For this, key elements for the fabrication of a single compact element are defined; such as the type of wood, gluing of lamellae and pressing schedule. In the second part, the study focuses on obtaining mechanical properties such as bending and stiffness of the beams made from continuous and finger jointed laminas. In the final stage, the data obtained from the laboratory tests is compared to determine the percentage of strength loss from the finger joint. Finally, these results are analyzed, to consider the use of glue laminated timber beams, with a lower implementation costs, in the constructive processes.

Keywords: Timber, glued laminated beams, structural elements, mechanical properties, bending strength, stiffness, deformation.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	14
1.1 Antecedentes	14
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo general.....	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
1.4 Alcance y resumen de contenidos	17
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	20
2.1 Generalidades de la madera	20
2.2 Madera como elemento estructural	20
2.2.1 Maderas estructurales	21
2.2.1.1 Recurso forestal en el Ecuador	22
2.3 Propiedades de la madera	22
2.3.1 Propiedades físicas de la madera.....	23
2.3.1.1 Contenido de humedad.....	23
2.3.1.2 Densidad y peso específico	25
2.3.1.3 Contracción e hinchamiento.....	26
2.3.2 Propiedades mecánicas de la madera.....	27
2.3.2.1 Resistencia a la flexión	27
2.3.2.2 Resistencia a la compresión	28
2.3.2.3 Resistencia a la tracción	29
2.3.2.4 Resistencia al corte.....	29
2.3.3 Propiedades elásticas de la madera	30
2.3.3.1 Módulo de elasticidad (MOE).....	31
2.3.3.2 Módulo de ruptura (MOR)	32
2.3.3.3 Módulo de corte	32
2.3.3.4 Módulo de Poisson	32
2.4 Madera laminada encolada	32
2.4.1 Historia.....	33
2.4.2 Características	35
2.4.3 Finger Joint	36
2.4.4 Adhesivos	37

2.4.5	Ventajas y desventajas de la madera laminada.....	37
2.4.5.1	Ventajas.....	37
2.4.5.2	Desventajas.....	38
CAPÍTULO 3: MARCO LEGAL		40
3.1	Normativa.....	40
3.1.1	Manual de diseño para maderas del Grupo Andino.....	40
3.1.2	Norma Chilena de la Construcción	41
3.1.2.1	NCh 1970: Especies latifoliadas. Clasificación visual para uso estructural	41
3.1.2.2	NCh 2150: Madera laminada encolada. Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de Pino radiata.....	47
3.1.3	DIN EN 408. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties.	49
3.1.3.1	Determinación de las dimensiones de las probetas.....	49
3.1.3.2	Determinación del módulo de elasticidad global mediante el ensayo de flexión estática	49
3.1.3.3	Determinación del módulo de ruptura mediante el ensayo de flexión estática	51
3.2	Esfuerzo máximo de flexión	51
CAPÍTULO 4: MATERIALES Y MÉTODOS		53
4.1	Madera.....	53
4.1.1	Pino Insigne	54
4.1.2	Canelo	54
4.1.3	Fernán Sánchez.....	54
4.2	Adhesivo	55
4.3	Metodología	58
4.3.1	Proceso de secado	58
4.3.2	Preparación de listones	61
4.3.3	Determinación del contenido de humedad.....	65
4.3.4	Proceso de fabricación de las vigas.....	68
4.3.4.1	Características del Finger Joint.....	68
4.3.4.2	Encolado.....	70
4.3.4.3	Prensado.....	71
4.4	Experimentos	72
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		75
5.1	Costos.....	75



5.2	Propiedades físicas	76
5.2.1	Clasificación visual.....	76
5.2.1.1	Pino Insigne (NCh 2150).....	76
5.2.1.2	Canelo (NCh 1970)	79
5.2.1.3	Fernán Sánchez (NCh 1970)	81
5.2.2	Humedad	83
5.3	Propiedades mecánicas	84
5.3.1	Módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) en vigas con listones continuos.....	84
5.3.2	Módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) en vigas con listones empalmados (Finger Joint).....	87
5.3.3	Análisis comparativo entre vigas con listones continuos y vigas con listones empalmados.	89
5.3.4	Mecanismos de falla	91
5.3.5	Cuantificación de los valores de resistencia obtenidos según la norma DIN EN 1194:1999 (Timber structures. Glued laminated timber. Strength classes and determination of characteristic values)	95
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		97
6.1	Conclusiones.....	97
6.2	Recomendaciones.....	100
BIBLIOGRAFÍA		101
ANEXOS		104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contenido de humedad de equilibrio (CHE) en función de la humedad relativa y temperatura.....	24
Figura 2. Direcciones ortogonales de la madera.	27
Figura 3. Curva típica fuerza-deformación de un material biológico.....	28
Figura 4. Esquema de ensayo de compresión.	29
Figura 5. Vigas laminadas con orientación horizontal.	33
Figura 6. Arco de madera Mont-Dauphin	34
Figura 7. Proceso de fabricación de madera laminada.	35
Figura 8. Tipos de uniones.	36
Figura 9. Dimensiones de arqueadura y encorvadura.....	45
Figura 10. Dimensiones de torcedura.	46
Figura 11. Disposición de la viga para ensayo de flexión.....	50
Figura 12. Diagramas de momento y cortante.	52
Figura 13. Secado natural del Pino.	59
Figura 14. Depósito bajo techo de la madera.....	59
Figura 15. Cámara de secado artificial de la madera.	60
Figura 16. Apilado de la madera en la cámara de secado artificial.	60
Figura 17. Máquina canteadora.....	61
Figura 18. Máquina de reaseerrado.	62
Figura 19. Sierra múltiple para madera.	62
Figura 20. Máquina para Finger Joint.....	63
Figura 21. Máquina moldurera.	64
Figura 22. Máquina trozadora.	64
Figura 23. Láminas continuas.	65
Figura 24. Láminas empalmadas.	65
Figura 25. Determinación de la humedad mediante xilohigrómetro.	66
Figura 26. Sección transversal para las vigas MLE.....	68
Figura 27. Vista en planta del corte Finger Joint.	69
Figura 28. Prensado del Finger Joint.	70
Figura 29. Encolado de las láminas.	71
Figura 30. Prensado de las vigas MLE.....	72
Figura 31. Disposición de cargas y apoyos en vigas con láminas continuas. ..	73
Figura 32. Disposición de cargas y apoyos en vigas con láminas empalmadas.	73
Figura 33. Ensayo a flexión viga de Canelo con láminas continuas.....	74
Figura 34. Disposición de los listones continuos de Pino Insigne.	77
Figura 35. Defectos en los listones de Pino Insigne.....	78
Figura 36. Dimensión de los nudos de Pino Insigne.	78
Figura 37. Disposición de los listones de Canelo.....	79
Figura 38. Defectos en los listones de Canelo.	80
Figura 39. Disposición de los listones de Fernán Sánchez.	81
Figura 40. Defectos en los listones de Fernán Sánchez.	82
Figura 41. Gráfica fuerza-deformación para vigas con listones continuos.	85

Figura 42. Gráfica fuerza-deformación para vigas con listones empalmados. .	87
Figura 43. Diferencias del MOE entre vigas con listones continuos y empalmados.....	90
Figura 44. Diferencias del MOR entre vigas con listones continuos y empalmados.....	90
Figura 45. Falla por tensión, viga Pino Insigne #1.....	93
Figura 46. Falla por corte horizontal, viga Canelo #2.	93
Figura 47. Falla por desprendimiento en las uniones, viga Canelo-FJ #1.....	94
Figura 48. Falla por compresión, viga Pino Insigne-FJ #1	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la madera estructural.....	41
Tabla 2. Clasificación visual de madera latifoliada destinada a uso estructural	42
Tabla 3. Arqueaduras y encorvaduras máximas admisibles para madera aserrada	44
Tabla 4. Arqueaduras y encorvaduras máximas admisibles para madera cepillada	45
Tabla 5. Torcedura equivalente máxima admisible para madera aserrada.....	46
Tabla 6. Torcedura equivalente máxima admisible para madera cepillada.....	46
Tabla 7. Especificaciones comunes a los dos grados de calidad definidos para madera aserrada destinada a la fabricación de laminados estructurales.....	47
Tabla 8. Módulos de elasticidad para los grados definidos al usar una clasificación estructural mecánica	48
Tabla 9. Especificaciones para los grados definidos al usar una clasificación estructural visual	48
Tabla 10. Especies de madera para elementos de MLE	53
Tabla 11. Especificaciones de la resina y el catalizador adquiridos.	56
Tabla 12. Información de la operación de encolado.....	57
Tabla 13. Distribución de vigas fabricadas.....	58
Tabla 14. Contenido de humedad para láminas de cada especie.....	67
Tabla 15. Precio por metro cúbico de la madera seca.	75
Tabla 16. Contenido de humedad promedio	83
Tabla 17. Dimensiones y resultados para MOE y MOR de vigas con listones continuos.....	84
Tabla 18. Valores promedio para vigas con listones continuos.....	86
Tabla 19. Dimensiones y resultados para MOE y MOR de vigas con listones empalmados.....	87
Tabla 20. Valores promedio para vigas con listones empalmados.....	88
Tabla 21. Relación de MOE y MOR entre vigas con listones continuos y vigas con listones empalmados.....	89
Tabla 22. Tipos de falla en las vigas ensayadas.....	92
Tabla 23. Clases resistentes según DIN EN 1194.	95
Tabla 24. Clases resistentes del ensayo.....	96

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Juan José Galindo Galindo en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación de las propiedades mecánicas de las vigas de madera laminada como elementos estructurales", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26-06-2020



Juan José Galindo Galindo

C.I: 0104807706

Cláusula de Propiedad Intelectual

Juan José Galindo Galindo, autor del trabajo de titulación “Determinación de las propiedades mecánicas de las vigas de madera laminada como elementos estructurales”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26-06-2020



Juan José Galindo Galindo

C.I: 0104807706

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación primeramente a Dios, por haberme ayudado y guiado a través de estos años para la culminación de la carrera.

A mis padres José y Elena, por su apoyo incondicional durante el proceso. Su amor y consejos me han permitido seguir con paso firme todos mis anhelos.

A mis hermanas Stephany y Denisse, quienes han depositado siempre su confianza en mí y me han llenado de motivaciones para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a mi familia, sin el apoyo y consejos de ellos no hubiese sido posible alcanzar esta etapa tan especial en mi vida.

Al Ing. Fernando Zalamea por aceptar y guiarme durante la elaboración de la tesis. Además, por sus enseñanzas en el periodo académico que fui su estudiante.

Gracias a la Universidad de Cuenca, por los conocimientos implantados a través de su excelente personal docente.

A las empresas AkzoNobel, EDEC EP y Maymu, sin las cuales no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

A Ariana, por su apoyo incondicional y por haberme ayudado con la toma de duras decisiones en mis años como estudiante.

Quiero agradecer a todos mis amigos, junto a ellos he podido disfrutar de las mejores experiencias en esta etapa de mi vida.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La madera junto a la piedra, han sido a lo largo de los siglos materiales muy utilizados para la construcción. En los inicios de la vida humana, la población acostumbraba a construir tanto sus herramientas como sus hogares a base de estos materiales. La madera en sí, como elemento constructivo con el pasar de los años fue demostrando un gran crecimiento, al ser empleada en la construcción de obras civiles de todo tipo. Con el pasar del tiempo y la aparición de nuevas tecnologías constructivas tales como el hormigón armado y el acero, la madera fue perdiendo protagonismo en la construcción. Las razones por las que se produjo este declive de la madera, y su incidencia cada vez menor en la construcción, fueron:

- Dificultad para encontrar secciones de madera en tamaños grandes.
- Conexiones y uniones poco eficientes, las cuales requerían ser talladas y reforzadas por elementos de acero como clavos, tornillos, pernos, platinas y láminas metálicas
- Inconvenientes al buscar madera con la forma apropiada.
- Variabilidad de las propiedades del material como: edad, humedad y tipo de madera.
- Material vulnerable a la humedad y al ataque de xilófagos.

Hoy en día la madera, a pesar de haber cedido terreno ante los nuevos materiales de construcción, se mantiene como una opción para el ingeniero o arquitecto por sus buenas propiedades, buen acabado y costos económicos. Además de poseer características estructurales aceptables, la madera representa una alternativa ecológica por ser un recurso renovable que no requiere de mucha energía para la obtención de su materia prima, en comparación de los otros materiales sintéticos que representan un mayor costo de producción y elaboración.

La importancia que tiene este material en la actualidad también obedece a que el avance tecnológico ha permitido elaborar productos con tamaños de sección, forma y longitud de acuerdo a las necesidades del proyecto, además la aparición de tratamientos para que la madera conserve un buen estado y su acabado sea estéticamente agradable, convirtiéndola así en un material fiable y de alta calidad en el ámbito constructivo.

Las vigas de madera laminada encolada datan del siglo XIX, cuando se sustituyó las bridas, pernos y otros sistemas de unión por la caseína o cola de carpintero. De ahí en adelante se produjeron varias patentes para este tipo de vigas, se mejoraron los tipos de adhesivos usados para la unión de los listones de madera, se adecuaron las características de resistencia mediante normas para la construcción con este tipo de sistemas y finalmente se afianzó como un producto altamente reconocido para la construcción de primera clase. Hoy en día las vigas de madera laminada son muy usadas en gran parte de Europa, Estados Unidos y países sudamericanos como Chile y Argentina, para la construcción de estructuras de cubierta, aunque su funcionalidad también es óptima para obras residenciales.

1.2 Justificación

En lo que refiere a sistemas estructurales, la madera y sobre todo las vigas de madera laminada han tenido un fuerte crecimiento en la actualidad; todo esto debido a las diversas características favorables tanto físicas como mecánicas que éstas poseen, tales como: ligereza, estética, durabilidad, resistencia a flexión, entre otras.

Al ser un material orgánico y renovable que no requiere de mucho consumo de energía para su producción y fabricación, ocupa un lugar importante dentro de la ingeniería y la construcción alternativa. Es por esto que, en países sudamericanos, la demanda de obras civiles a partir de este material aumenta cada vez más por las aptitudes y cualidades que presenta la madera.

Debido a la falta de, conocimiento, tecnología e industrias dedicadas únicamente a la fabricación de elementos laminados, el país no ha generado una norma específica para el estudio y aplicación de las vigas de madera laminada, que proporcionan una mayor resistencia y rigidez para las estructuras. Por lo tanto, muchas veces se opta por usar los métodos constructivos tradicionales establecidos en la (NEC-15) que pueden resultar en incremento de costos innecesarios para cierto tipo de obras.

Por todo esto, se busca obtener, a partir de determinados ensayos sobre las vigas, sus principales características de resistencia y durabilidad; para poder comparar los resultados de estos sistemas constructivos con los sistemas tradicionales y establecer los tipos de obra idóneos para cada uno de ellos; con el fin de proyectar en el medio un uso más frecuente de las vigas de madera laminada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Elaborar vigas de madera laminada para la determinación de las principales características mecánicas y su aplicación como elementos estructurales en obras de ingeniería.

1.3.2 Objetivos específicos

- Investigar en el mercado local los materiales y maquinaria necesarios para la fabricación de vigas de madera laminada.
- Determinar los tipos de madera que posean buen rendimiento estructural. Cuantificar las características propias de cada tipo y escoger la que mejores resultados arroje para su posterior ensayo en el laboratorio.

- Establecer los diferentes implementos necesarios para dimensionar las vigas según los ensayos que se vayan a realizar y determinar sus propiedades mecánicas.
- Establecer los ensayos a realizarse sobre el material escogido y en las vigas laminadas.
- Aplicar el método de flexión cuasi-estática para obtener las diferentes propiedades mecánicas en vigas del tipo de madera seleccionado.
- Determinar la capacidad a flexión y el módulo de ruptura de las vigas de madera, mediante los datos obtenidos en el laboratorio de la Universidad de Cuenca en la prensa de cargas.
- Comparar los resultados de vigas de madera elaboradas a partir de listones continuos, con vigas fabricadas mediante listones empalmados con uniones dentadas.

1.4 Alcance y resumen de contenidos

En el presente proyecto de trabajo de titulación se pretende exponer todas las fortalezas, ventajas y comodidades que posee la madera como elemento estructural, en especial, el comportamiento y propiedades que tienen las vigas de madera laminada y su posible capacidad de sustituir a elementos comunes, en la construcción de obras ingenieriles livianas, tales como, vigas de hormigón armado y acero.

La estructura del trabajo está dividida en cinco secciones o capítulos, cuyos contenidos se explican a continuación:

CAPÍTULO 1: Introducción

- Antecedentes
- Justificación
- Objetivo general y específicos
- Alcance y resumen de contenidos

CAPÍTULO 2: Marco teórico

- En este segundo capítulo se explica con detalle toda la información acerca de la madera como elemento estructural. Se expone además todas las propiedades físicas y mecánicas que la madera posee y sus cualidades para la construcción. Finalmente se puntualiza la base teórica de las vigas de madera laminada.

CAPÍTULO 3: Marco legal

- En esta sección se profundiza en lo que refiere a la fabricación de las vigas de madera laminada, de acuerdo a la normativa existente. Se dimensionan las vigas y se determinan los ensayos a los cuales son sometidas.

CAPÍTULO 4: Materiales y métodos

- En el presente capítulo se detallan las especies forestales con las cuales se va a trabajar. Además, se especifica todo el proceso de construcción de una viga de madera laminada; es decir, desde la obtención de la madera hasta el ensamblado final del elemento. Finalmente, se explica los experimentos realizados sobre las vigas.

CAPÍTULO 5: Análisis y discusión de resultados

- El quinto capítulo se enfoca en los resultados obtenidos de las vigas. Se analizan datos como: costos, humedad, módulo de elasticidad, módulo de ruptura, mecanismos de falla y por último la clase resistente a la cual pertenecen cada una de las vigas.

CAPÍTULO 6: Conclusiones y recomendaciones

- El capítulo final presenta las conclusiones del trabajo de titulación y las recomendaciones para futuros proyectos investigativos o técnicos, con las vigas de madera laminada como tema principal.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades de la madera

La madera es un material no homogéneo que, a diferencia de otros materiales de construcción, es un producto orgánico que no necesita de mucha energía para su transformación a un producto apto para usarse. Su variedad de formas y orientaciones hacen de este material un potencial adversario para los clásicos métodos constructivos a base de hormigón y acero. Por otro lado, la variabilidad del material hace que ninguna madera, incluso extraída del mismo tronco, posea las mismas propiedades.

La madera, al igual que el resto de materiales, posee características tanto microscópicas como macroscópicas. En lo que refiere a las microscópicas, la madera posee tejidos o estructuras celulares que, dependiendo de su tipo, orientación y forma, definirán la capacidad del árbol para afrontar sus necesidades naturales tales como: conducción, resistencia mecánica y almacenaje.

Las características macroscópicas de la madera indican que el tronco en sí, consta de tres partes; la región interna duramen, la zona media denominada albura y la corteza como la capa final. En las dos primeras capas se forman los llamados anillos del tronco que, a medida que el árbol crece, se van extendiendo desde el centro hacia fuera e indican la edad y la forma de crecimiento del árbol. Además, existen un sin número de cualidades macroscópicas, que caracterizan a determinada especie de madera, tales como: textura, brillo, radios leñosos, color, dureza, grano, etc. Todo esto se puede evidenciar a partir de tres cortes esenciales que se realizan sobre los troncos de madera: transversal, radial y tangencial (Dávalos, 2012).

2.2 Madera como elemento estructural

La madera como elemento estructural ha sido utilizada a lo largo de la historia gracias a sus excelentes características estructurales. Todas estas cualidades

han sido superadas, hasta cierto punto en la actualidad, por la infinidad de formas y conexiones que permiten el acero y el hormigón armado.

La madera estructural presenta una belleza estética, propiedades físico-mecánicas óptimas en el ámbito de la construcción y además cuenta con la ventaja de ser un recurso forestal renovable. El proceso de obtención de la materia prima resulta mucho más rápido y económico que los procesos tradicionales del hormigón y el acero. Sin duda alguna, la propiedad que tiene la madera como elemento estructural, hace de este material un potencial elemento alternativo y competitivo considerando su relación costo-funcionabilidad.

Las propiedades que un elemento de madera posee como elemento estructural, han sido estudiadas a lo largo de los años, a través de ensayos sobre probetas, para determinar las verdaderas potencialidades técnicas que esta posee. Una de las desventajas que presenta la madera es que, los ensayos en laboratorio no necesariamente van a representar lo que realmente ocurre en estructuras de madera a escalas mayores; siempre habrá diferencias, ya que en estructuras grandes se necesitan elementos, de mayor envergadura, con uniones o cortes que producirán efectos negativos en los valores de resistencia o elasticidad.

2.2.1 Maderas estructurales

Dentro de la construcción, los tipos de madera pueden clasificarse en dos grandes grupos: la madera blanda y la madera dura. Sin embargo, estas dos definiciones no representan verdaderamente el grado de dureza o de finura de una madera. Dentro de la madera blanda, o también llamada conífera, están los árboles como Pinos o Cipreses; mientras que los de madera dura, también conocidos como árboles de hoja ancha, tienen entre sus más conocidos el Roble y el Eucalipto. Las maderas que más se usan en la construcción generalmente son las maderas blandas, las cuales deben tener un rápido crecimiento, es decir que sean renovables, y además no necesariamente deben ser caras y de una gran calidad (Parker, 1972).

2.2.1.1 Recurso forestal en el Ecuador

Según la Norma Ecuatoriana de la construcción (NEC-15), el país consume aproximadamente 5 millones de m³/año de madera rolliza para diferentes usos. La fuente principal de abastecimiento son los bosques nativos (70%) y las plantaciones forestales (30%). La norma establece que la madera para la construcción debe provenir de bosques nativos manejados sustentablemente, es decir que sean renovables, caso contrario puede convertirse en un material que, con el paso del tiempo, se extinga o se degrade.

En lo que refiere a maderas duras o latifoliadas, el Ecuador posee plantaciones de esta especie tales como: Eucalipto, Chanúl, Caoba, Yumbingue, Guayacán. Todas estas, provenientes de un proceso de crecimiento lento, que a su vez provoca que tengan una mayor densidad y una capacidad portante mejor. Al ser una especie de lento desarrollo, se la considera como costosa y no renovable en el ámbito constructivo.

Las coníferas o blandas por su parte, al ser de un crecimiento rápido, presentar una ligereza adecuada y poseer una densidad baja, las convierte en un material con muchas ventajas en el ámbito constructivo. En el país, ya que no se ha desarrollado del todo, el campo estructural con maderas blandas, se usan principalmente dos tipos: el Pino y el Ciprés.

A todo esto, se debe aclarar que si bien la norma indica que la madera para construcción debe provenir de bosques nativos; algunas de las especies usadas en el Ecuador tales como: Eucalipto o el Pino son especies introducidas.

2.3 Propiedades de la madera

En la actualidad, la madera como elemento estructural, es bien reconocida gracias a sus excelentes propiedades tanto físicas como mecánicas. Estas propiedades representan partes fundamentales del tronco ya que permiten que este soporte fenómenos externos además de ayudar a que el árbol se mantenga derecho. El origen de las propiedades físicas de la madera viene dado por

factores intrínsecos del material, es decir, propiedades resultantes de su periodo de crecimiento. Por otro lado, las propiedades mecánicas dependerán de fuerzas exteriores que se apliquen sobre la madera y la respuesta que el material dé (Enríquez, 2014).

Se sabe que estas propiedades, dependiendo del tipo de madera, serán variables. Especímenes de madera de la misma especie, incluso del mismo tipo de árbol, presentarán diferentes propiedades debido a distintos factores, que intervienen en el crecimiento y formación del material, tales como: condiciones del suelo de la zona, contenido de humedad del tronco, detalles externos que intervinieron en la formación del árbol y sección del tronco de donde fue extraída. Por lo tanto, para exigencias mecánicas altas, se usa por lo general madera proveniente del duramen, que no debe ser mezclada con madera de otras secciones del tronco, ya que variarán las propiedades.

2.3.1 Propiedades físicas de la madera

Las propiedades físicas de la madera dependen únicamente de factores intrínsecos del material y de la especie. En el ámbito estructural las diferentes propiedades tales como densidad, humedad, peso específico, contracción, entre otras, influirán en el comportamiento de la madera para su uso estructural, por lo que es de gran importancia estudiar cada una de ellas.

2.3.1.1 Contenido de humedad

La madera, en sus paredes celulares, posee una gran cantidad de agua, en estado libre, de constitución y de impregnación. El contenido de humedad, que este material exhibe, dependerá ciertamente de varios factores como: especie de madera, edad de la madera y tipo de madera. Los poros, que se encuentran en la mayoría de las maderas livianas, contribuirán a un mayor contenido de humedad, a diferencia de las maderas pesadas.

Luego de que un árbol es cortado, evidenciará pérdida de humedad, y el contenido de humedad seguirá un constante descenso durante toda la etapa de fabricación. El contenido de humedad es expresado como el porcentaje del peso de agua contenida en la madera respecto al peso de la madera secada al horno (anhidra).

Para el uso estructural de la madera, el contenido de humedad tiene dos conceptos importantes. Uno de ellos es el punto de saturación de las fibras (PSF), que refiere al estado de la madera en el cual se ha evaporado toda el agua libre en las cavidades celulares, pero sus paredes celulares aún permanecen saturadas; en este punto la humedad de la madera oscila entre el 24 y el 30%. Por otro lado, se tiene el contenido de humedad de equilibrio (CHE), que es la pérdida de humedad por parte del material hasta alcanzar un equilibrio con la atmosfera circundante; el CHE viene dado, por lo tanto, por el contenido máximo de humedad que la madera puede poseer dentro de una determinada temperatura y humedad relativa de la atmósfera (Hansen, 1970) (Figura 1).

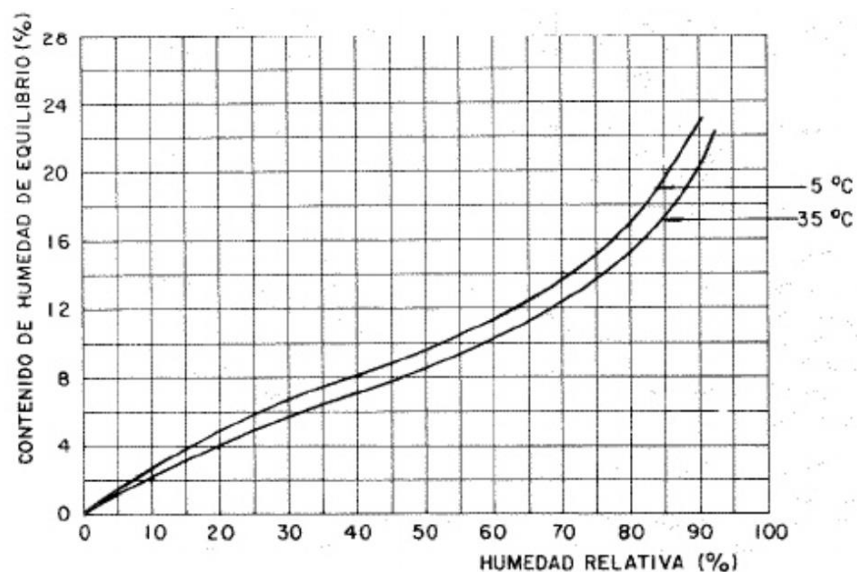


Figura 1. Contenido de humedad de equilibrio (CHE) en función de la humedad relativa y temperatura.

Fuente: JUNAC(PADT-REFORT), "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. Pág. 2-5

Conforme la madera se seca más allá de su punto de saturación (PSF), aumenta su resistencia, sin embargo, las propiedades de resistencia al impacto

o tenacidad disminuirán ya que la madera totalmente seca no ofrece suficiente capacidad para doblarse. Por consiguiente, el contenido óptimo de humedad dependerá de las solicitudes de la obra y las condiciones a las que estará expuesto el material.

2.3.1.2 Densidad y peso específico

Se conoce al término densidad como, la relación que se obtiene al comparar la masa y el volumen de un cuerpo. El peso o masa de la madera, vendrá expresado como la sumatoria entre la parte sólida de la madera más su contenido de humedad. En cambio, el volumen será constante cuando la pieza de madera esté en estado verde, es decir recién cortada; el volumen disminuirá cuando el CHE se encuentre por debajo del PSF, y finalmente el volumen volverá a ser constante cuando se someta al elemento de madera a un proceso de secado total. Por estas razones, se pueden diferenciar cinco tipos de densidades según en el estado en el que se encuentre la madera.

- **Densidad verde:**
$$\frac{\text{Peso Verde}}{\text{Volumen Verde}}$$
- **Densidad seca al aire:**
$$\frac{\text{Peso seco al aire}}{\text{Volumen seco al aire}}$$
- **Densidad anhidra:**
$$\frac{\text{Peso seco al horno}}{\text{Volumen seco al horno}}$$
- **Densidad básica:**
$$\frac{\text{Peso seco al horno}}{\text{Volumen verde}}$$
- **Densidad normal:**
$$\frac{\text{Peso al 12\% de humedad}}{\text{Volumen al 12\% de humedad}}$$

Por lo general, cuando se requiere determinar las características mecánicas de la madera, los ensayos sobre las probetas son adecuados a un 12% de humedad. La densidad de la madera aumentará si se consigue un mayor contenido de humedad, y por regla general, la resistencia mecánica de las

probetas mejorará ante una mayor densidad. En la mayoría de los casos, las maderas de mayor densidad proveerán una mayor cantidad de material leñoso, no obstante, este tipo de maderas presentan dificultad en el trato y la trabajabilidad.

La densidad es una de las propiedades físicas más importantes de la madera, ya que está estrechamente asociada a la resistencia mecánica y durabilidad del material. En función de la densidad aparente de las maderas, estas se pueden clasificar en livianas (<0.5), semi pesadas ($0.5-0.7$) y pesadas (>0.8), de manera que se debe tener en cuenta estos aspectos, para la planeación del tipo de material a usar en determinada obra.

El peso específico, por su parte, relaciona la masa o peso de la madera, con un contenido de humedad determinado, con el volumen de agua desalojado por el volumen de la madera. Asumiendo que la densidad del agua es igual a 1, se tiene que la relación entre la densidad de la madera y la densidad del agua equivale al peso específico.

2.3.1.3 Contracción e hinchamiento

A través del secado y la constante pérdida de humedad, la madera tiende a cambiar su volumen; la contracción de la madera se produce cuando el agua contenida en las paredes celulares empieza a desaparecer a razón de un secado por debajo del punto de saturación de la fibra (PSF). Como es de esperarse, los elementos o probetas de madera sufrirán una disminución en sus dimensiones, tanto para los ejes tangencial, radial y longitudinal. La contracción tangencial será en promedio 2 veces mayor que la contracción radial, mientras que la contracción longitudinal es considerada mínima de modo que se desprecia.

El hinchamiento, por su parte, es el proceso inverso a la contracción que ocurre cuando la madera gana humedad aumentando su volumen y por supuesto sus dimensiones. En el sentido radial aumentará un 2.5 y 6% mientras que en el sentido longitudinal será un cambio leve. El peso de una madera sumergida tendrá una variación entre 50 y 150%, sin embargo, no es una variación

constante puesto que al llegar al punto de saturación el volumen se estabilizará, aunque la madera continúe absorbiendo agua.

2.3.2 Propiedades mecánicas de la madera

La madera posee tres direcciones principales ortogonales: longitudinal, tangencial y radial (Figura 2). En la práctica se analiza tanto la dirección paralela como la perpendicular a la fibra o grano. Las propiedades mecánicas procuran dar una idea general de las características resistentes del material para cada tipo de esfuerzo. Estas características se obtienen a través de ensayos en los cuales se determinan los esfuerzos a los que puede estar sometido el material (Caranguí & Lasso, 2010).

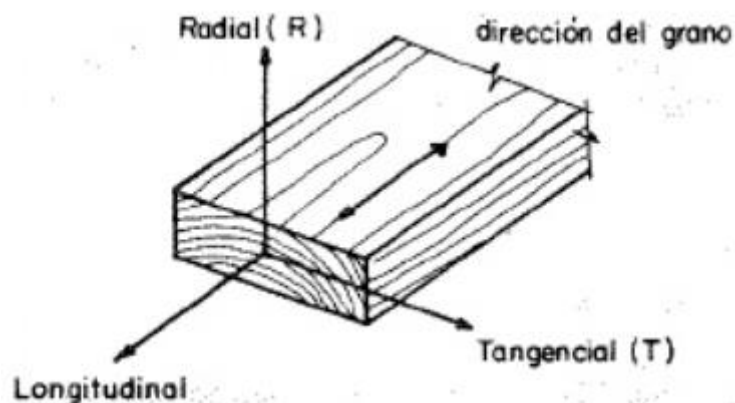


Figura 2. Direcciones ortogonales de la madera.

Fuente: JUNAC(PADT-REFORT), "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. Pág. 1-21

2.3.2.1 Resistencia a la flexión

Uno de los esfuerzos primordiales, presente en las vigas de madera, es la flexión paralela a la fibra. En un ensayo típico de flexión estática, el material, previo a su ruptura, atraviesa tres fases en las cuales, a medida que la carga aumenta, evidencian un cambio de estado representado mediante la gráfica de Carga-Deformación (Figura 3).

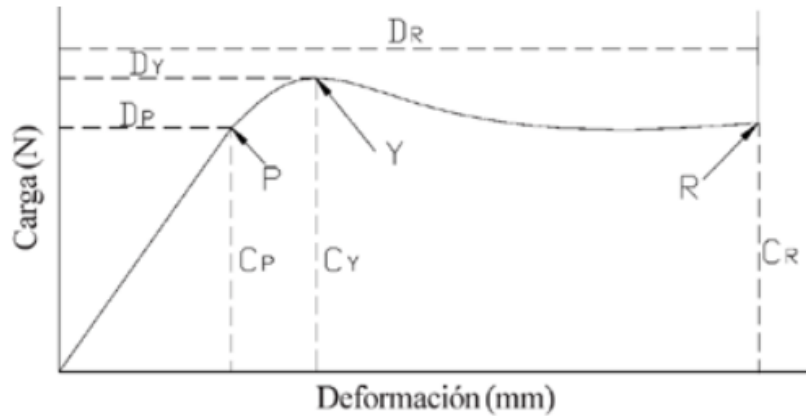


Figura 3. Curva típica fuerza-deformación de un material biológico.

Fuente: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662004000100015

En efecto, en la Figura 3 se puede observar que, la madera posee un rango elástico, seguido de un punto de inflexión “P” que es el límite proporcional donde la madera llega a su esfuerzo admisible; posteriormente el material atraviesa el rango plástico en el cual las deformaciones son permanentes y finalmente el material llega a su punto de ruptura “R” llegando a su carga máxima de capacidad. En la mayoría de las especies madereras la resistencia a la compresión es menor que a la tracción, produciéndose así un desplazamiento del eje neutro de la probeta hacia la zona de tracción (Enríquez, 2014).

Es posible que en un ensayo a flexión la curva no presente los mismos rangos expuestos en la Figura 3, puesto que, después del rango elástico la viga puede llegar a su punto de ruptura sin la necesidad de pasar por el rango plástico.

2.3.2.2 Resistencia a la compresión

Al tratar de comprender la resistencia a compresión de la madera, en la práctica se puede determinar dos tipos de capacidades, la resistencia a la compresión paralela y la resistencia a la compresión perpendicular (Figura 4). En el ámbito constructivo, generalmente, el pandeo y la capacidad a compresión paralela rigen en las columnas de las estructuras, mientras que en las vigas es de gran importancia conocer capacidad a compresión perpendicular.

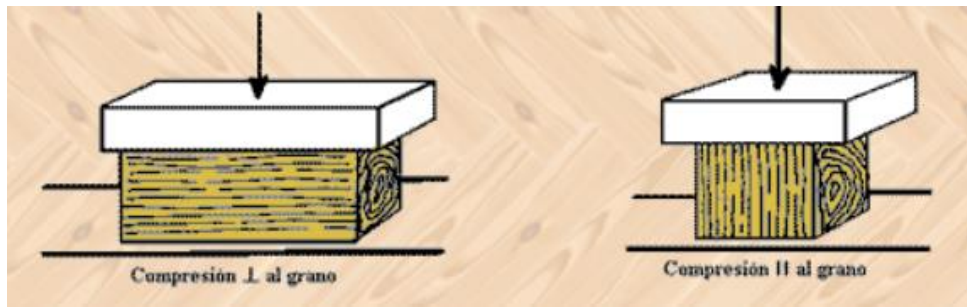


Figura 4. Esquema de ensayo de compresión.

Fuente: <https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/propiedades-fisicas>

Las fibras o granos orientados en la misma dirección del eje longitudinal hacen que la resistencia a la compresión de la madera sea mayor en su sentido paralelo que en su sentido perpendicular. El esfuerzo al límite proporcional en dirección perpendicular oscila entre $1/4$ y $1/5$ del esfuerzo al límite proporcional en dirección paralela.

2.3.2.3 Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción de la madera también viene dada por la orientación de sus fibras. La capacidad a tracción perpendicular, para fines prácticos, se puede considerar nula ya que puede llegar a ser de 30 a 70 veces menor que la resistencia a tracción paralela; esta última, a su vez, en probetas libres de fallo alguno, presenta valores que aproximadamente duplican la resistencia a compresión paralela de la madera. El tipo de falla, para este ensayo, es súbita y dependerá en gran medida de la orientación o inclinación del grano.

2.3.2.4 Resistencia al corte

La madera presenta algunas combinaciones de esfuerzos al ser sometida a determinadas cargas; una de ellas es la combinación entre la flexión y el corte. Debido a esto, en general, los valores de la resistencia al corte resultan menores a los teóricos y en ciertos casos se complica su determinación. Por otro lado, en

elementos constructivos el esfuerzo cortante predominante es el paralelo al grano del material, y va a depender en gran medida del cementante de las fibras llamado lignina, el cual establecerá la verdadera resistencia al corte paralelo de la madera.

2.3.3 Propiedades elásticas de la madera

La teoría elástica de la madera, pese a ser muy amplia debido a que el material es ortotrópico, se puede resumir para ámbitos constructivos en la homogeneidad del material y la presencia de tres módulos únicamente: elástico, de corte y Poisson. Estas propiedades, relacionan principalmente las deformaciones versus los esfuerzos del material bajo cierta carga.

Al ser un material ortotrópico, presentará diferentes propiedades en función del plano de simetría estudiado, longitudinal, radial o tangencial (Figura 2). La ecuación constitutiva que representa el comportamiento elástico de la madera se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\mu_{RL}}{E_R} & \frac{-\mu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & \frac{-\mu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_{LT}}{E_L} & \frac{-\mu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix}$$

Donde:

L : Dirección longitudinal

E : Módulo de elasticidad

R : Dirección Radial

G : Módulo de corte

T : Dirección tangencial

μ : Módulo de Poisson

ε : Deformación unitaria

γ : Distorsión

σ : Esfuerzo normal

τ : Esfuerzo cortante

Se tiene que la dirección longitudinal es paralela a las fibras, por tanto, las direcciones radial y tangencial son perpendiculares a las fibras y en consecuencia las propiedades mecánicas en la dirección radial y tangencial son las mismas.

$$\frac{-\mu_{RL}}{E_R} = \frac{-\mu_{TL}}{E_T}$$

$$\frac{-\mu_{RT}}{E_R} = \frac{-\mu_{TR}}{E_T}$$

$$\frac{-\mu_{LR}}{E_L} = \frac{-\mu_{LT}}{E_L}$$

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1}{G_{LR}}$$

2.3.3.1 Módulo de elasticidad (MOE)

Directamente, a partir de una curva esfuerzo-deformación obtenida de un ensayo a compresión paralela, o indirectamente a través de ensayos a flexión, puede ser hallado este módulo. Este parámetro, que detalla la capacidad del material para resistir deformaciones, resulta mayor en ensayos a compresión paralela que a flexión; usualmente se toma el MOE de ensayos a flexión, ya que estas deflexiones son las que predominan para el dimensionamiento de elementos constructivos.

2.3.3.2 Módulo de ruptura (MOR)

Cuando una viga es cargada hasta la falla, los esfuerzos de tensión, compresión y corte, pasan a llamarse esfuerzos de rotura. Esta medida corresponde al esfuerzo máximo en las fibras a compresión y tensión durante el ensayo a flexión. Bajo la aplicación de cargas ubicadas en los tercios del vano del elemento estructural, la rotura aparecerá en el punto crítico ubicado en el tercio central.

2.3.3.3 Módulo de corte

También llamado módulo elástico transversal, resulta del relacionamiento de las deformaciones con los esfuerzos de corte que las producen. Para poder hacer una comparación con el MOE generalmente se usa el módulo paralelo a la dirección del grano o fibra. Este módulo oscila entre 0.04 y 0.06 veces el módulo de elasticidad lineal.

2.3.3.4 Módulo de Poisson

La relación entre la deformación lateral y la longitudinal producida se la conoce como el módulo de Poisson. Como se mencionó anteriormente, la madera al ser un material ortotrópico, presentará seis módulos de Poisson según la dirección considerada. Datos característicos de este parámetro, para maderas coníferas, rondan entre 0.32 y 0.40 siempre que se tengan densidades cercanas a los 0.50 gr/cm³. **(Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino)**

2.4 Madera laminada encolada

La madera laminada encolada, como su nombre lo dice, es un sistema estructural que está formado por láminas o listones de madera maciza unidos mediante adhesivo especial aplicado en sus caras; de tal manera que el grano o fibra quedan en la misma dirección del eje longitudinal del elemento. Al tener las

piezas laminares escuadradas entre sí, este material se convierte en un componente versátil que no está limitado en su dimensionamiento (Rodas & Urgiles, 2015) (Figura 5).

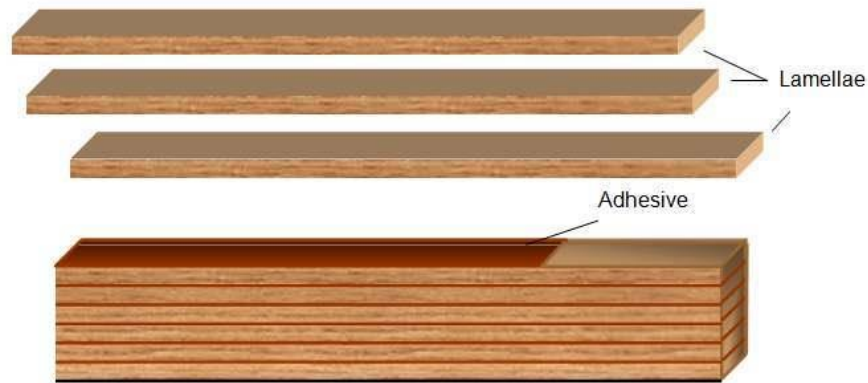


Figura 5. Vigas laminadas con orientación horizontal.

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Glued-laminated-timber-GLT-beam_fig1_319176730

2.4.1 Historia

La madera, por ser un material usado a lo largo de los siglos, ha tenido un sinfín de avances tanto estructurales como estéticos. En un principio, la demanda de grandes luces para las edificaciones, suponía un problema para los constructores. Philibert Delorme, en el siglo XVI, a partir del concepto del arco de piedra, aplica estas bases en arcos de madera, en los cuales se podía obtener secciones comprimidas en todos los puntos de la estructura. Delorme estableció el inicio de muchos avances que se darían posteriormente (Figura 6).

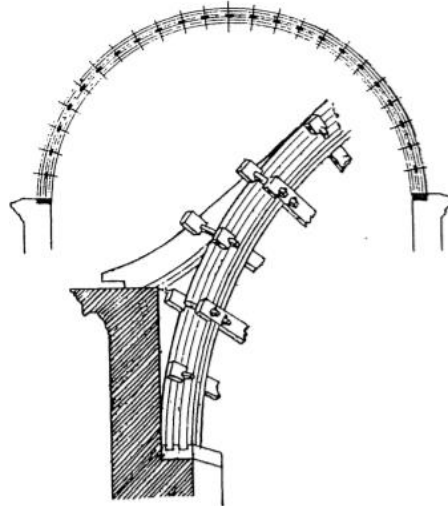


Figura 6. Arco de madera Mont-Dauphin

Fuente: Somoza, Luis. "La Madera Laminada Encolada: Historia y Definición"

En 1872 el Coronel Emy introdujo la técnica de madera laminada para sistemas curvos, acoplados mediante bridas y pasadores metálicos. Estos sistemas fueron utilizados en la construcción de basílicas y estaciones de ferrocarriles. Finalmente, en los primeros años del siglo XX, surgió la madera laminada encolada, utilizándose caseína en sustitución a las bridas y pernos. La patente del método constructivo y elaborativo estuvo a cargo del alemán Otto Hetzer, quien es considerado el precursor de la madera laminada encolada (Somoza, 1986).

El efecto Segunda Guerra mundial desató un avance en el desarrollo y en la fabricación de la madera laminada encolada. Se incorporaron nuevos adhesivos resistentes al agua, lo que hacía posible la construcción de puentes y detalles al aire libre mediante este sistema. De ahí en adelante, el crecimiento de la madera laminada ha sido significativo, siendo en Europa y los Estados Unidos un material con mucha demanda; además de poseer una gran cantidad de normas e industrias especializadas que lo fabrican.

2.4.2 Características

Este tipo de estructura está conformada básicamente por los listones de madera, el adhesivo especial y las uniones dentadas en caso de ser necesarias. El tipo de madera, el tipo de adhesivo, el número y espesor de los tableros encolados, así como las dimensiones del elemento final, variarán de acuerdo a las condiciones a las que se someterá el elemento y a las aplicaciones para las cuales se lo requiere.

Las clases de madera blanda, o también llamadas coníferas, gracias a su acelerada tasa de crecimiento, son las más usadas para la fabricación de la madera laminada. La madera, antes de su proceso de fabricación, debe estar secada, saneada, cepillada y con la menor presencia posible de grietas y nudos que puedan ocasionar fallos estructurales no deseados. Para que la madera y el adhesivo tengan un mejor desempeño, se recomienda que la humedad de la madera a usarse esté un rango del 8 al 15% siendo el 12% el valor óptimo (Figura 7).

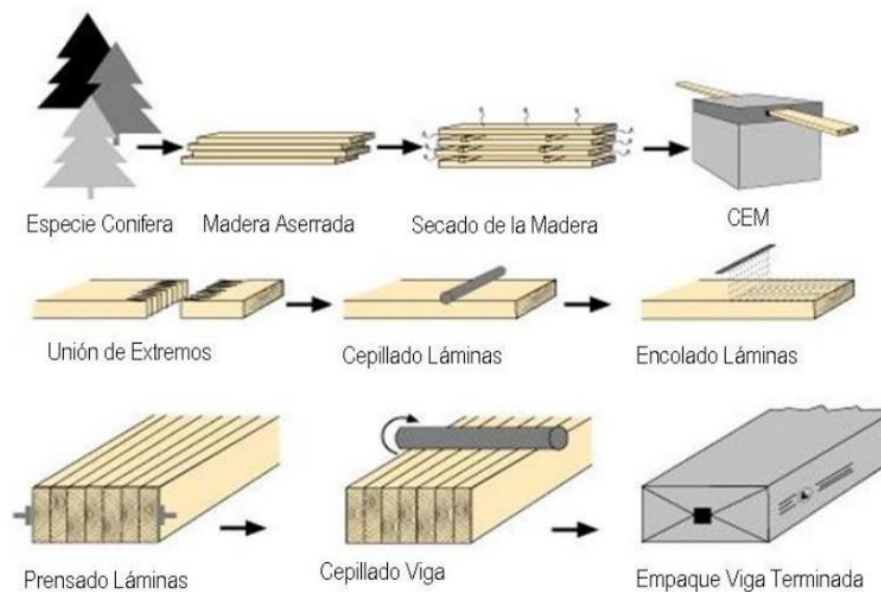


Figura 7. Proceso de fabricación de madera laminada.

Fuente: Fabricación Madera Laminada Encolada. Universidad Tecnológica de Chile

2.4.3 Finger Joint

Para poder construir vigas de grandes luces se usan principalmente dos tipos de uniones entre las láminas de madera adyacentes; las dentadas y las inclinadas. El tipo de unión inclinada, por lo general, tiene pendientes entre el 8 y 12% para asegurar una buena superficie de contacto. Por otra parte, la unión dentada o también llamada Finger Joint, une los listones a través de dientes con una profundidad mayor a 12 mm y dispuestos con perfiles horizontales como verticales (Figura 8). Esta segunda técnica es la más utilizada gracias a su eficaz acoplamiento entre listones. Durante el proceso de alguno de los dos métodos, se debe verificar que no existan nudos en las uniones.

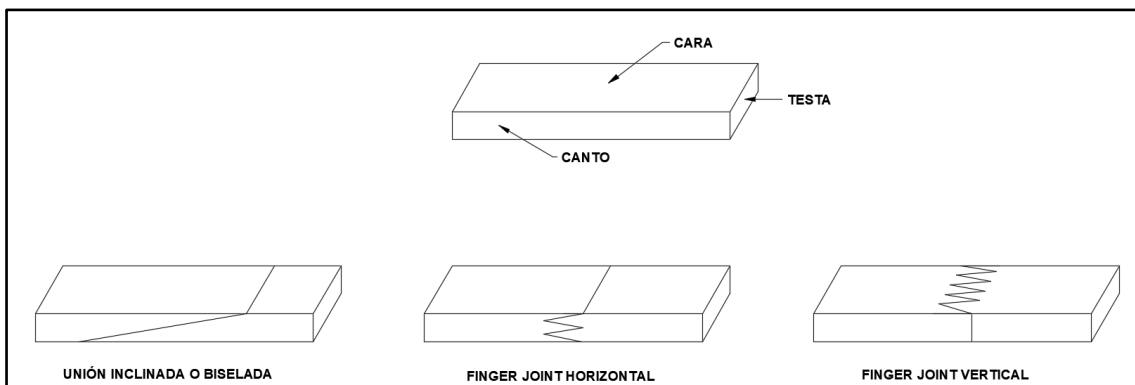


Figura 8. Tipos de uniones.

La elaboración de perfiles verticales, al ser transversal a la cara de la pieza, requiere de cuchillas e implementos de mayores dimensiones; este método es muy usado principalmente en países europeos. Por otra parte, en EEUU y Canadá se elaboran comúnmente los perfiles horizontales, los cuales, al estar en el canto de las láminas, requieren una menor cantidad de cuchillas.

Debido a que el perfil vertical posee una mayor cantidad de dientes, y por lo tanto una mayor adherencia entre las partes, se ha determinado que la resistencia aumenta en un 9% para este perfil (Louw, 1964).

2.4.4 Adhesivos

Los adhesivos más comunes en la industria de las vigas de madera laminada encolada (MLE) son los adhesivos a base de resinas sintéticas termo - fraguables y resinas sintéticas termoplásticas (PVA). Las resinas (PVA) a base de emulsiones de acetato polivinilo, actualmente no se las usa para elementos expuestos a la humedad e intemperie ya que su capacidad estructural es minimizada.

En cambio, los adhesivos termo - fraguables como la Urea Formaldehído, Fenol Formaldehído, Resorcinol Formaldehído y Melamina Formaldehído, se han ido combinando con el paso del tiempo para perfeccionar la calidad del pagamento y obtener mejores características resistentes. Las combinaciones, Melamina Urea Formaldehído (MUF) y Resorcinol Fenol Formaldehído (RFF), son las más utilizadas en la actualidad debido a que ofrecen un gran comportamiento estructural y una larga durabilidad (Dávalos, 2012).

2.4.5 Ventajas y desventajas de la madera laminada

Todas las cualidades que la madera laminada posee, se pueden observar de una mejor manera, comparándolas con las características y propiedades de otros materiales de construcción como el acero y el hormigón.

2.4.5.1 Ventajas

- Es un material sustentable y renovable que no requiere un alto costo energético para su transformación y producción.
- Sin limitaciones dimensionales, gracias a que el adhesivo admite que las piezas sean cortadas según las necesidades del proyecto.
- El peso específico de la madera es bajo en comparación al acero y hormigón, por lo tanto, se puede conseguir que las estructuras sean ligeras, pero igual de resistentes a un costo inferior. Es decir, su relación peso-resistencia es mejor que sus competidores.

- No posee un grado de alteración alto ante los diferentes tipos de agentes químicos que podrían suscitarse antes y después de la etapa de construcción.
- A pesar de ser un material combustible, ante una eventualidad de fuego, la madera conserva sus propiedades mecánicas durante un periodo de tiempo más largo que el hormigón y el acero, gracias a su bajo coeficiente de conductividad térmica.
- Se puede lograr estructuras mucho más estéticas que las usuales. Además, las vigas se pueden acondicionar a formas curvas lo cual es una complicación para los otros materiales. Toda esta flexibilidad del material hace que la construcción con madera ofrezca un ilimitado arsenal de formas únicas.
- El tiempo de ejecución y montaje se reduce ya que es un elemento prefabricado listo para colocar en obra. De igual manera, el tiempo y costo invertido en mantenimiento es relativamente bajo en comparación con los otros materiales.

2.4.5.2 Desventajas

- Como se mencionó anteriormente, en nuestro medio no se cuenta aún con el conocimiento, tecnología e industrias necesarias para abarcar el proceso constructivo de obras con vigas MLE de gran envergadura y diferentes formas.
- Para estructuras al exterior y en contacto con el suelo, se necesita realizar un mejoramiento en la madera, ya sea aplicando algún tipo de barniz o hacer un tratamiento de autoclave con la madera, en el cual se le añaden sustancias químicas para mejorar su resistencia.
- Ya que la madera laminada es un elemento prefabricado, cuando se tienen vigas de grandes luces y, en ciertos casos, curvas, el transporte de las mismas tendrá ciertas complicaciones.
- Todo el proceso constructivo de estos elementos resulta más costoso que trabajar con madera sin laminar. Todo esto se detalla en la implementación del adhesivo, pérdida de un porcentaje de madera al

momento de la fabricación y finalmente la mano de obra y maquinaria que necesita ser más especializada.

- Se necesita de un control estricto de elaboración ya que ante una negligencia, ya sea en el laminado o en la unión adyacente, el elemento podría perder sus propiedades mecánicas.
- Requiere de un riguroso cálculo de conexiones. Estas pueden ser tradicionales, con herrajes metálicos y con clavijas. Un mal empleo o diseño de estas conexiones puede producir deformaciones no deseadas en la estructura o desgarros en los elementos.

CAPÍTULO 3: MARCO LEGAL

3.1 Normativa

En el presente estudio se usarán tres diferentes tipos de madera para la fabricación de vigas de madera laminada encolada (MLE). El proceso de, la validación de la madera adecuada, clasificación visual de la madera, determinación de propiedades físicas y mecánicas y construcción de las vigas, está regido a diferentes normas que establecen los criterios mínimos y necesarios para obtener un producto de buena calidad y de resultados confiables.

Como se mencionó anteriormente, en el Ecuador las normas de construcción no contemplan este sistema de vigas ensambladas mediante pegamento especial, por esta razón se trabajará con las normas chilenas, alemanas y del grupo andino, para la elaboración de las probetas.

3.1.1 Manual de diseño para maderas del Grupo Andino

Este manual, editado por la Junta del Acuerdo de Cartagena, es una recopilación de múltiples investigaciones realizadas por personas experimentadas, provenientes de los países de la región andina del continente. La información, que aquí se puede hallar, está relacionada con la tecnología e ingeniería de madera tropical en el ámbito constructivo.

Además de sugerencias y recomendaciones para todo tipo de diseños de muros, columnas, vigas, etc., el manual clasifica, a partir de la densidad básica, la madera estructural en tres rangos, A, B y C siendo el rango A el que percibe una mayor densidad y por lo tanto mayor rigidez y resistencia. Uno de los principales esfuerzos de la madera sometida a flexión, el módulo de ruptura, está relacionado directamente con la densidad básica del material.

Tabla 1. Clasificación de la madera estructural

GRUPO	DENSIDAD (g/cm ³)	RESISTENCIA
A	0,71 – 0,90	Mayor
B	0,56 – 0,70	Intermedia
C	0,40 – 0,55	Menor

Fuente: JUNAC(PADT-REFORT), "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982.

3.1.2 Norma Chilena de la Construcción

Las normas chilenas estarán destinadas, en el proyecto, para la clasificación visual de la madera. Estas normativas se encargan de postular los requisitos mínimos exigibles para el uso de la madera en las estructuras. La NCh 1970 y la NCh 2150 establecen ciertos criterios para una clasificación gradual de los diferentes tipos de madera a usarse.

3.1.2.1 NCh 1970: Especies latifoliadas. Clasificación visual para uso estructural

La norma NCh 1970, aplicable a todas las especies de madera latifoliadas o duras que tengan un uso estructural, a pesar de ser una norma para elementos macizos, no establece impedimento alguno para el trabajo con elementos de madera laminada. El contenido de humedad, de las piezas que serán procesadas, puede estar en cualquier porcentaje, no obstante, la norma recomienda un CHE (contenido de humedad en equilibrio con el medio ambiente) para que el uso estructural sea eficiente. Dependiendo de las características y defectos de las piezas, se las clasificará de acuerdo a cuatro grados.

- **Especificaciones generales de los grados estructurales**
 - Dimensiones y tolerancias
 - Contenido de humedad

- Método de clasificación
- Marcado
- Preservación

- **Especificaciones particulares de los grados estructurales**

Tabla 2. Clasificación visual de madera latifoliada destinada a uso estructural

Defectos y especificaciones		Grado N°1	Grado N°2	Grado N°3	Grado N°4
Generales		Cada pieza debe estar correctamente aserrada de modo que superficies adyacentes sean ortogonales entre sí, cumplir con las tolerancias especificadas y tener los extremos despuntados con un corte normal al eje de la pieza.			
Perforación - Pudrición - Evidencia de madera de reacción		No se aceptan	No se aceptan	No se aceptan	No se aceptan
Corteza incluida	Se aceptan trozos individuales sólo en extremos de la pieza, siempre que su longitud, l , cumplan con:	No se aceptan	$l \leq 75$ mm	$l \leq 150$ mm	$l \leq 200$ mm
	Se aceptan trozos individuales que no aparezcan en un extremo de la pieza y ubicados en una zona de 600 mm de largo medida desde dicho extremo, siempre que su longitud, l , cumpla con:	No se aceptan	$l \leq 150$ mm	$l \leq 300$ mm	$l \leq 400$ mm
	Se aceptan trozos individuales que no aparezcan en un extremo de la pieza ni en una zona de 600 mm de largo a contar de dicho extremo y que además estén fuera de la mitad central del espesor, con tal que sus largos, l , cumplan con:	$l \leq 300$ mm Separación > 300 mm	$l \leq 600$ mm Separación > 300 mm	No se limitan en estos grados	
	Se aceptan trozos individuales que no aparezcan en un extremo de la pieza ni en una zona de 600 mm de largo a contar de dicho extremo y que además estén en la mitad central del espesor, con tal que sus largos, l , cumplan con:	$l \leq 150$ mm Separación > 300 mm	$l \leq 300$ mm Separación > 300 mm	$l \leq 600$ mm Separación > 300 mm	$l \leq 800$ mm Separación > 300 mm
Nudos	Se aceptan nudos sanos - circulares - ovalados - y en la arista, con tal que su dimensión, d , cumpla con:	$d \leq 1/7$ del ancho de la superficie donde él aparece	$d \leq 1/4$ del ancho de la superficie donde él aparece	$d \leq 1/3$ del ancho de la superficie donde él aparece	$d \leq 3/8$ del ancho de la superficie donde él aparece

Desviación de la fibra		Menor que 1 en 15	Menor que 1 en 10	Menor que 1 en 8	Menor que 1 en 6	
Bolsillos (de goma, resina y/o crecimientos anormales)	Se aceptan si su longitud, ℓ , medida en la superficie de ancho a , en la cual aparecen cumple con:	$\ell \leq 3a$ y además $\ell \leq 300$ mm (tomar el menor de los dos valores)				
	Se aceptan si aparecen sólo en una superficie de ancho a y el ancho, S , del defecto cumple simultáneamente con:	$S \leq a/4$ y además $S \leq 12$ mm	$S \leq a/3$ y además $S \leq 20$ mm	$S \leq a/2$ y además $S \leq 25$ mm	$S \leq a/2$ y además $S \leq 30$ mm	
	Se aceptan si aparecen en una superficie de ancho a , se extienden a otra superficie y el ancho, S , del defecto cumple simultáneamente con:	$S \leq a/8$ y además $S \leq 6$ mm	$S \leq a/4$ y además $S \leq 12$ mm	$S \leq a/2$ y además $S \leq 20$ mm	$S \leq a/3$ y además $S \leq 25$ mm	
Arista faltante	Se acepta si el área afectada, A , sola o acumulada, cumple con:	$A \leq e \cdot a/10$	$A \leq e \cdot a/5$	$A \leq e \cdot a/4$	$A \leq e \cdot a/4$	
	Se acepta si, además, su dimensión, d , en el canto cumple con:	$d \leq e/3$				
Acebolladura	Se acepta si su ancho, S , cumple con:	$S \leq 3$ mm				
	Se acepta si, además, la longitud acumulada ($\Sigma \ell$) cumple con:	$\Sigma \ell \leq L/10$	$\Sigma \ell \leq L/6$	$\Sigma \ell \leq L/4$	$\Sigma \ell \leq L/3$	
	Se acepta si, además, su extensión cumple con:	No abarcar más de una de las superficies de la pieza				
Grietas	Superficiales	Se aceptan en superficies de hasta 75 mm de ancho siempre que el ancho, S , del defecto cumpla con:	$S \leq 2$ mm	No se limitan, se aceptan de cualquier ancho		
		Se aceptan en superficies mayores de 75 mm de ancho siempre que el ancho, S , del defecto cumpla con:	$S \leq 3$ mm	No se limitan, se aceptan de cualquier ancho		
	Internas (controladas en las cabezas de las piezas)	Se aceptan si la proyección, S , del defecto sobre el canto de la pieza cumple con:	$S \leq e/4$	$S \leq e/3$	$S \leq e/2$	$S \leq 2 \cdot e/3$

Rajaduras en los extremos de la pieza		No se aceptan	Se aceptan si: $\Sigma l \leq a$ y además $\Sigma l \leq 100$ mm	Se aceptan si: $\Sigma l \leq 1,5 \cdot a$ y además $\Sigma l \leq 150$ mm
	Acanaladura	Se acepta si su dimensión no excede de 1 mm por cada 50 mm de ancho de pieza		
Alabeos	Arqueadura y encorvadura	Ver Tablas 3 y 4 para determinar valor admisible		
	Torcedura	Ver Tablas 5 y 6 para determinar valor admisible		
a = ancho de la pieza; e= espesor de la pieza; L= longitud de la pieza; d= magnitud del defecto l = longitud del defecto; Σl = longitud acumulada del defecto; S= ancho del defecto ; A= área afectada por el defecto				

Fuente: Instituto Nacional de Normalización INN Chile. NCh 1970. Año: 1988 – Tabla 1.

Tabla 3. Arqueaduras y encorvaduras máximas admisibles para madera aserrada

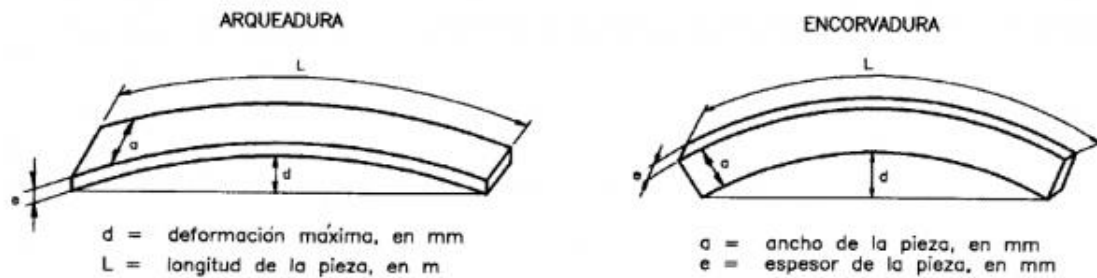
Ancho (a) para la encorvadura, o espesor (e) para la arqueadura, en mm	Arqueaduras y encorvaduras máx. admisible, d, en mm							
	Para una longitud L en m, igual a							
	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,4	6,0
38	10	20	35	50	60	70	75	80
50	9	16	27	36	45	50	55	60
75	7	12	19	25	29	31	40	45
100	5	9	14	19	25	30	40	45
125	4	7	11	15	21	29	36	43
150	3	6	9	13	18	24	30	37
175	3	5	8	11	16	20	26	32
200	2	4	7	10	14	18	23	28
225	2	4	6	9	12	16	20	25
250	1	3	5	8	11	14	18	22
275	1	3	5	7	10	13	16	21
300	1	3	5	7	9	12	15	19

Fuente: Instituto Nacional de Normalización INN Chile. NCh 1970. Año: 1988 – Tabla 2.

Tabla 4. Arqueaduras y encorvaduras máximas admisibles para madera cepillada

Ancho (a) para la encorvadura, o espesor (e) para la arqueadura, en mm	Arqueaduras y encorvaduras máx. admisible, d, en mm							
	Para una longitud L en m, igual a							
	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,4	6,0
34	11	22	38	57	65	76	83	88
45	10	18	30	40	50	57	62	67
70	8	13	20	26	31	33	41	46
95	6	10	15	20	26	30	40	45
120	4	7	12	16	22	30	37	44
145	3	6	9	14	19	25	31	38
170	3	5	8	12	16	21	27	32
195	2	4	87	10	14	18	24	28
220	2	4	6	9	13	16	21	26
245	1	3	5	8	11	14	18	23
270	1	3	5	7	10	13	17	21
295	1	3	5	7	9	12	15	19

Fuente: Instituto Nacional de Normalización INN Chile. NCh 1970. Año: 1988 – Tabla 3.


Figura 9. Dimensiones de arqueadura y encorvadura.

Fuente: Instituto Nacional de Normalización INN Chile. NCh 1970. Año: 1988

Tabla 5. Torcedura equivalente máxima admisible para madera aserrada

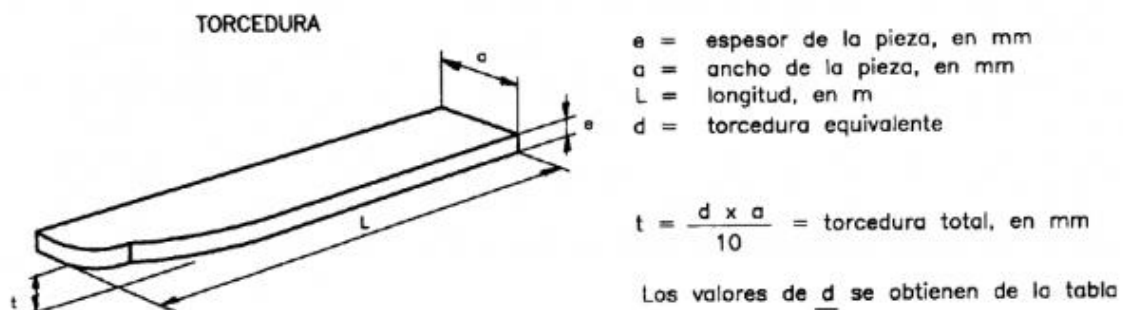
Espesor e, mm	Torcedura equivalente máx. admisible, d, en mm por cada 10 mm de ancho de la pieza							
	Para una longitud L, en m, igual a							
	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,4	6,0
38	1,6	2,1	2,6	3,1	3,6	4,2	4,7	5,3
50	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0
75	0,8	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1	2,4	2,7
100	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
125	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6
150	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3

Fuente: Instituto Nacional de Normalización INN Chile. NCh 1970. Año: 1988 – Tabla 4.

Tabla 6. Torcedura equivalente máxima admisible para madera cepillada

Espesor e, mm	Torcedura equivalente máx. admisible, d, en mm por cada 10 mm de ancho de la pieza							
	Para una longitud L, en m, igual a							
	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,4	6,0
34	1,8	2,4	2,9	3,5	4,0	4,6	5,1	5,9
45	1,3	1,8	2,2	2,6	3,1	3,6	4,1	4,4
70	0,7	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	2,9
95	0,6	0,8	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1
120	0,5	0,6	0,7	1,0	1,2	1,3	1,4	1,7
145	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,2	1,3	1,4

Fuente: Instituto Nacional de Normalización INN Chile. NCh 1970. Año: 1988 – Tabla 5.


Figura 10. Dimensiones de torcedura.

Fuente: Instituto Nacional de Normalización INN Chile. NCh 1970. Año: 1988

3.1.2.2 NCh 2150: Madera laminada encolada. Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de Pino radiata

La norma NCh 2150, por otro lado, está estructurada únicamente para el estudio sobre madera aserrada de Pino radiata. Además, a diferencia de la norma NCh 1970, presenta el detalle para la fabricación de elementos estructurales laminados encolados específicamente. En este caso, la norma limita su uso para especímenes con humedades inferiores al 16% y con laminación horizontal únicamente. La calidad de la madera, dependiendo del método de clasificación (mecánico y visual) que se use, determinará el grado al que pertenece, siendo el Grado A el de mejor calidad.

- **Consideraciones generales**

Tabla 7. Especificaciones comunes a los dos grados de calidad definidos para madera aserrada destinada a la fabricación de laminados estructurales

Característica o defecto		Especificación			
Alabeos *	Acanaladura	Se acepta con las magnitudes máximas siguientes:			
		Espesor nominal, mm	Acanaladura máxima admisible, mm		
			Ancho nominal, mm		
			100 ó menos	150	200 o más
		25	Ninguna	1	3
	38	Ninguna	1	2	
50	Ninguna	Ninguna	1		
	Arqueadura, encorvadura y torcedura	Se acepta con una magnitud máxima de 1,2 cm en 360 cm de longitud			
Contenido de humedad		No mayor de 16 %			
Manchas y médula		Se aceptan la mancha azul y la presencia de médula sólo en el Grado B, con excepción de las dos láminas externas, en ambos cantos de la pieza laminada			
Pudrición y perforación		No se aceptan			
Resina		No se aceptan piezas con alto contenido de resina en la superficie a encolar			
Agujeros, nudos sueltos, nudos firmes		Si estos defectos quedan ubicados en el 20 % extremo de la longitud de la pieza deben cumplir con las especificaciones de la Tabla 9.			
* Para láminas más delgadas (menos de 25 mm) estos requerimientos pueden rebajarse cuando se dispone de un adecuado sistema de prensado que elimine la distorsión durante el ensamblado.					

Fuente: Instituto Nacional de Normalización INN Chile. NCh 2150. Año: 1991 – Tabla 1.

- **Clasificación estructural mecánica**

Tabla 8. Módulos de elasticidad para los grados definidos al usar una clasificación estructural mecánica

Clases	Módulo de elasticidad aparente de cada pieza de madera aserrada, E_f , en MPa
Grado A	$E_f \geq 9000$
Grado B	$9000 > E_f \geq 4000$

Fuente: Instituto Nacional de Normalización INN Chile. NCh 2150. Año: 1991 – Tabla 2.

- **Clasificación estructural visual**

Tabla 9. Especificaciones para los grados definidos al usar una clasificación estructural visual

Característica o defecto	Especificaciones para el		Observación
	Grado A	Grado B	
Agujeros - Nudos sueltos - Nudos firmes	La suma de las magnitudes de todos los nudos contenidos en cada longitud de 300 mm, tomada en intervalos de 60 mm no debe exceder: 35 % del ancho de la cara (0,35a)		a= ancho de la cara
Alabeos	de 1/2 del ancho de la cara (0,50a)		Ver apartado al pie de la Tabla 7.
Arista faltante (canto muerto)	Ver Tabla 7.		
Bolsillos	Se acepta en un canto a lo largo de la pieza, si la magnitud máxima del defecto es 4 mm, la cual debe desaparecer cuando el elemento laminado sea cepillado		
Contenido de humedad	Se aceptan bolsillos "secos", con un ancho máximo de 3 mm y con una longitud igual al ancho de la pieza siempre que ellos aparezcan ocasionalmente		
Desviación de la fibra	No mayor que 16 %		
Grietas y rajaduras	Menor que 1:10	Menor que 1:8	
Manchas	Las piezas deben estar "sin" grietas, rajaduras o acebolladuras que formen un ángulo menor o igual a 45° con la cara de la pieza		
Pudrición y perforación	Ver Tabla 7.		
Resina	No se aceptan		
Velocidad de crecimiento	Ver Tabla 7.		
	Más de 0,8 anillo por cada cm	Más de 0,7 anillo por cada cm	

Fuente: Instituto Nacional de Normalización INN Chile. NCh 2150. Año: 1991 – Tabla 3.

3.1.3 DIN EN 408. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties.

La norma alemana DIN EN 408 establece los criterios mínimos para el dimensionamiento de productos MLE. En esta norma, además, se detalla el proceso para la obtención de las propiedades mecánicas, tales como el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR), en las vigas elaboradas.

3.1.3.1 Determinación de las dimensiones de las probetas

- Las dimensiones de todos los especímenes a ensayar deberán ser medidas con una precisión del 1 %.
- Las medidas deberán ser tomadas 150 mm a partir de los extremos de la pieza.
- Si el ancho de la viga es variable, se deberá hacer un promedio con tres diferentes medidas tomadas a lo largo de la pieza.

3.1.3.2 Determinación del módulo de elasticidad global mediante el ensayo de flexión estática

- El espécimen deberá tener una longitud mínima de 19 veces la altura de la sección transversal. En caso de no ser posible, se deberá registrar el vano de la viga.
- La pieza de ensayo deberá estar situada en un vano de 18 veces la altura de la sección.
- Se aplicarán simétricamente dos cargas puntuales a lo largo del vano. Si los equipos y la viga no permiten estas condiciones se permitirá variar, la distancia entre las cargas y los apoyos, en 1,5 veces la altura de la sección y además el vano podrá modificar su longitud en 3 veces la altura de la sección siempre y cuando se mantenga la simetría del ensayo.
- Debe ser una viga simplemente apoyada.

- De ser necesario se pueden colocar restricciones laterales para evitar problemas por pandeo. Las restricciones deberán permitir que la viga se deflecte sin una fricción significativa.
- La deformación “w” debe ser tomada en el centro del vano de la viga, ya sea en el extremo de compresión o de tensión.
- La velocidad de carga no debe ser mayor a 0,003 h [mm/s]

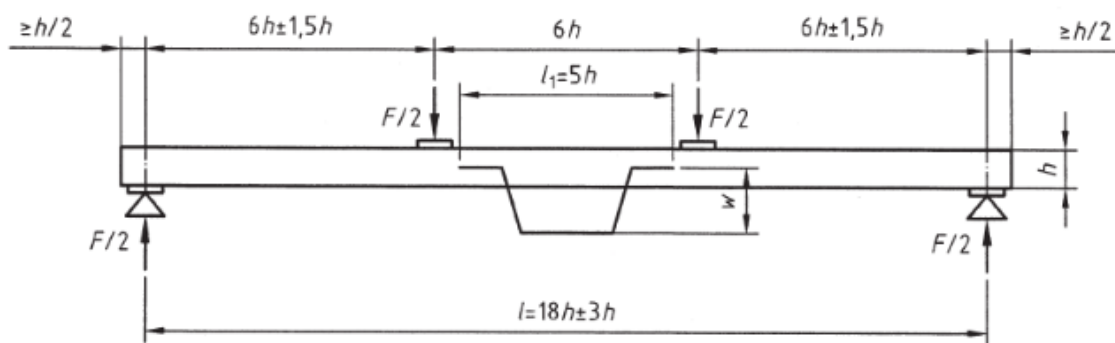


Figura 11. Disposición de la viga para ensayo de flexión.

Fuente: DIN-EN 408:2003 “Timber structures-Structural timber and glued laminated timber- Determination of some physical and mechanical properties”.

$$E_{m,g}(MOE) = \frac{l^3(F2 - F1)}{bh^3(w2 - w1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right]$$

Dónde:

- $E_{m,g}$: Módulo de elasticidad global [N/mm²]
 l : Distancia entre apoyos [mm]
 b : Ancho de la sección transversal [mm]
 h : Altura de la sección transversal [mm]
 $F2 - F1$: Diferencia de carga en el rango elástico de la curva fuerza-deformación [N]
 $w2 - w1$: Diferencia de deformación correspondiente a F2-F1 [mm]
 a : Distancia entre el punto de carga y el apoyo más cercano [mm]

3.1.3.3 Determinación del módulo de ruptura mediante el ensayo de flexión estática

- Para hallar el módulo de ruptura se recomiendan las mismas especificaciones usadas para el módulo de elasticidad global.
- La velocidad del ensayo deberá ser tal que, la máxima carga se alcance en un rango de 180 y 420 segundos. En el caso de que alguna probeta no cumpla con este tiempo, deberá ser registrada.
- El modo y desarrollo de la fractura en la sección de cada viga, deberá ser apuntado.

$$f_m(MOR) = \frac{aF_{max}}{2W}$$

$$W = \frac{bh^2}{6}$$

Dónde:

f_m : Módulo de ruptura [N/mm²]

a : Distancia entre el punto de carga y el apoyo más cercano [mm]

F_{max} : Carga de rotura [N]

W : Módulo de resistencia de la sección [mm³]

3.2 Esfuerzo máximo de flexión

El módulo de ruptura (MOR) establecido por la norma alemana DIN EN 408, no es más que una fórmula simplificada del esfuerzo de flexión máximo determinado a partir de la teoría de resistencia de materiales. Para una viga simplemente apoyada (Figura 12), se obtienen los siguientes diagramas de momento y cortante:

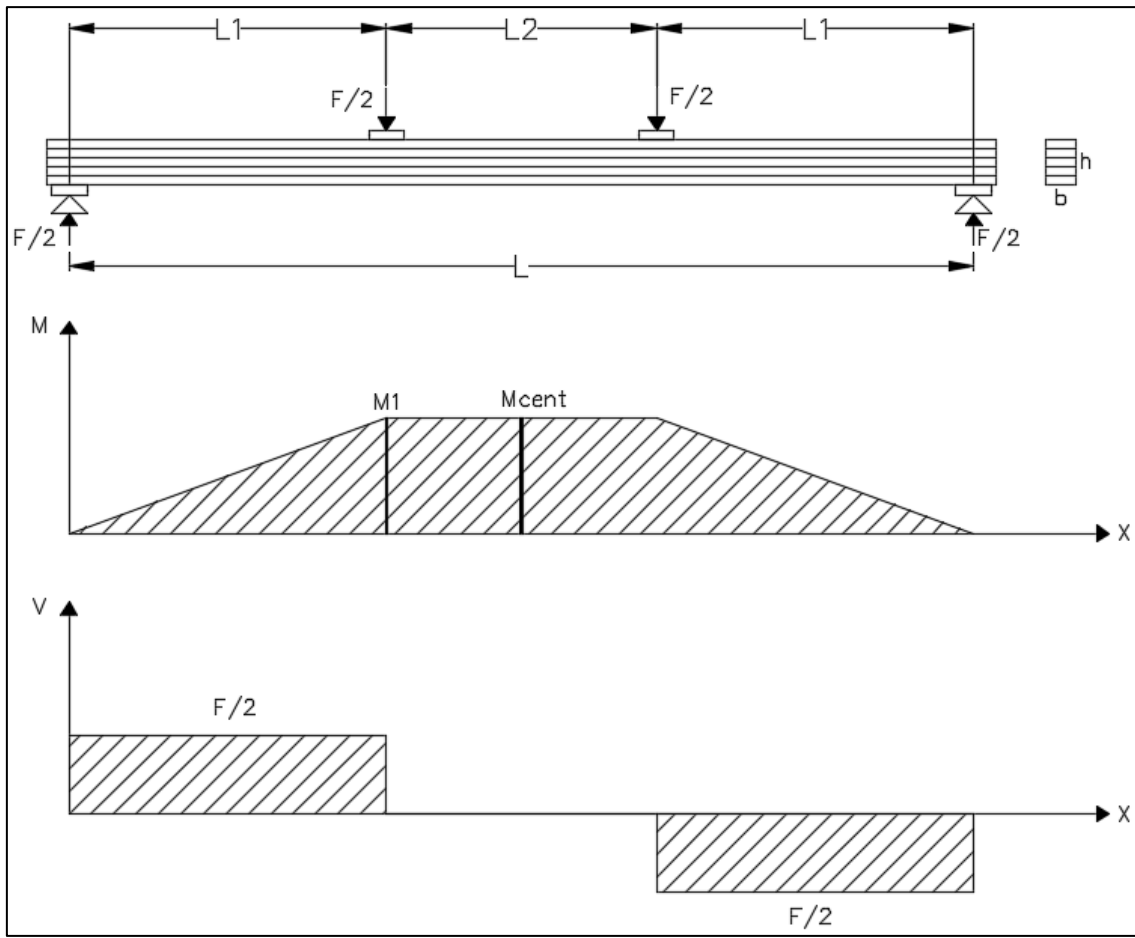


Figura 12. Diagramas de momento y cortante.

El esfuerzo máximo de flexión viene dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M \cdot c}{I}$$

Donde:

M : Momento flector [N/mm^2]

$$M = M_1 = M_{cent} = \frac{F}{2} \cdot L_1$$

c : Distancia máxima al eje neutro ($h/2$) [mm]

I : Momento de inercia de la sección [mm^4]

$$I: \frac{b \cdot h^3}{12}$$

CAPÍTULO 4: MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de titulación, cuenta con el apoyo de la Empresa Pública Municipal de Desarrollo Económico de Cuenca EDEC EP, la cual, a través de su proyecto, Innovacentro de la Madera y Mueble, hace posible la preparación y fabricación de todos los elementos a ensayarse. Por otro lado, la medición de la humedad mediante el xilohigrómetro y los cortes de las uniones dentadas (Finger Joint), se realizan en la empresa Maymu, la cual cuenta con las cuchillas de dimensiones específicas para la práctica.

Finalmente, todo el proceso de los ensayos a flexión y determinación de las propiedades mecánicas de los especímenes, se lo realiza en la prensa del Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de Cuenca.

4.1 Madera

En los ensayos de flexión se pretende determinar las propiedades mecánicas de los elementos MLE, a partir de 3 diferentes tipos de madera que son muy usadas en el ámbito constructivo local. Para establecer una comparación, no sólo desde la parte estructural, sino desde la parte económica, se ha planteado el uso de especies de madera dura, semidura y suave.

Tabla 10. Especies de madera para elementos de MLE

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA	TIPO
Pino Insigne	<i>Pinus radiata</i>	Pinaceae	Suave - Conífera
Canelo	<i>Nectandra acutifolia</i>	Lauraceae	SemiDura - Latifoliada
Fernán Sánchez	<i>Triplaris cumingiana</i>	Polygonaceae	Dura - Latifoliada

Fuentes: -JUNAC(PADT-REFORT), "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. Pág. 1-7

-Propiedades Anatómicas, Físicas y Mecánicas de 93 Especies Forestales. Quito-Ecuador: 2014. Pág. 67

4.1.1 Pino Insigne

También llamado Pino monterrey, es un árbol introducido en el Ecuador y que puede llegar a alcanzar los 60 m de altura y 100 cm de diámetro. Al ser una especie de crecimiento rápido, el Pino Insigne, tarda aproximadamente 22 años en alcanzar el grado de madurez. Posee una densidad básica de 0.39 g/cm^3 y sus usos son básicamente, la fabricación de muebles, tableros aglomerados y contrachapados y ebanistería.

La madera, que se usa para la fabricación de las probetas, es proveniente de la provincia de Cotopaxi y se distribuye en forma de tablas (290x21x2) cm y tablones (290x21x4,5) cm.

4.1.2 Canelo

Proveniente del Oriente ecuatoriano; esta especie de madera posee una densidad básica entre 0.40 y 0.45 g/cm^3 , lo que conlleva a que sea una madera moderadamente pesada. Su tronco alcanza los 20 m de altura y alrededor de 60 cm de diámetro. Su tiempo de rotación es de 20 años, es decir, el tiempo en que alcanza su grado de madurez y puede ser procesado. Sus usos son diversos, sin embargo, destaca en el ámbito constructivo y mobiliario.

Los tablones (290x21x4,5) cm en el presente trabajo, provienen de la provincia de Morona Santiago y se usan para la fabricación de las vigas de madera laminada.

4.1.3 Fernán Sánchez

Es una especie de madera latifoliada, nativa de Galápagos, Costa y los Andes. Conocido con otros nombres como Muchín o Muchina, el árbol puede llegar a unos 30 m de altura y 50 cm de diámetro. Su densidad básica oscila los 0.57 g/cm^3 y su grado de madurez es alcanzado a los 20 años. Al ser una madera

dura, sus usos están direccionados hacia la construcción en general en forma de vigas, postes y tablas para domicilios.

La provincia de Esmeraldas, es uno de los lugares donde más se cultiva esta especie, por lo que los tablonos (240x21x4,5) cm son adquiridos de aquel lugar para la determinación de sus propiedades.

4.2 Adhesivo

El pegamento escogido para la fabricación de las vigas de madera, es el Melamina Urea Formaldehído (MUF), gracias a sus características resistentes y duraderas. Su aplicación es destinada a los sistemas de vigas laminadas y Finger Joint para estructuras de madera portantes de carga.

La resina viene con un catalizador que endurece la mezcla y que se emplea en cierto porcentaje según las especificaciones del proyecto. La empresa encargada de producir y distribuir este producto en el Ecuador es AkzoNobel.

Tabla 11. Especificaciones de la resina y el catalizador adquiridos.

	UF 1242			HARDENER 2542		
Producto	Adhesivo Melamina Urea Formaldehído			Hardener		
Forma de entrega	Líquido			Líquido		
Color	Blanco opaco			Crema (amarillo claro)		
Viscosidad¹	7700 mPa.s*			9000 mPa.s*		
Densidad¹	1253 kg/m ³			1320 kg/m ³		
pH¹	8,68			2,75		
Contenido de sólidos	66,94%			No aplica		
Tiempo de vida (meses)	15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F	15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F
	---	8	4	---	6	---
Condiciones de almacenamiento	Temperatura de almacenamiento recomendada: 15 a 25°C/59 a 77°F. Solamente se permiten cortos tiempos de exposición a temperaturas superiores a 30°C / 86°F e inferiores a 10°C/50°F. El producto no puede ser congelado para después ser usado debido a cambios irreversibles en el producto.					
Información de Formaldehído	Formaldehído libre 0,21 %			No contiene Formaldehído		
¹ : A temperatura de 25°C/77°F *mPa.s : MiliPascal.segundo. Unidad de viscosidad en el sistema Internacional (SI) equivalente a 0,001 kg/(m.s)						

Fuente: Certificados de análisis. AkzoNobel.

Tabla 12. Información de la operación de encolado.

Tipo de prensa	Prensa en caliente y en frío			
Temperatura mínima de la línea de cola	No trabajar por debajo de 20°C/68°F			
Tiempo de prensa	Temp. de la cola en la unión 20°C/68°F	Relación de mezcla 100:20		
		10 h		
	30°C/86°F	3 h		
		Relación de mezcla 100:15		
Temp. de la cola en la unión 20°C/68°F	9 h			
	30°C/86°F 2h 45'			
Tiempo de vida	Relación de mezcla	15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F
	100:20	2h 30'	1h 40'	50'
	100:25	2h	1h 20'	40'
Presión	Madera blanda mínimo 5 kgf/cm ² (0,5 MPa)			
	Madera dura mínimo 10 kgf/cm ² (1 MPa)			
	Lamelas de 33 mm mínimo 7 kfg/cm ² (0,7 MPa)			
	Lamelas de 45 mm mínimo 9 kfg/cm ² (0,9 MPa)			
Tiempo de ensamble (20°C/68°F)	Cond. Encolado	Relación mezcla	Máx. Tiempo cerrado*	
	250 g/m ² / 51 L/1000 ft ²	100:20	1h 20'	
	400 g/m ² / 82 L/1000 ft ²	100:20	1h 50'	
	250 g/m ² / 51 L/1000 ft ²	100:25	1h 10'	
	400 g/m ² / 82 L/1000 ft ²	100:25	1h 40'	
Relación de mezcla (por peso)	100:20 ó 25 (Adhesivo: Catalizador).			
	La exactitud en la cantidad de catalizador debe ser ±1 parte en peso tanto en operación separada o mezclados.			
Esparcimiento de adhesivo	170 a 450 g/m ²			
	En vigas laminadas se recomienda 250 a 450 g/m ²			
	En Finger Joint se recomienda de 125-150 g/m aplicado en cada cara.			
Contenido de humedad de la madera	8 a 15%, en vigas se recomienda preferiblemente 10-12%			
Post Curado	Superior a 5 días a 20°C/68°F. Después del tiempo de prensado la línea de cola debe alcanzar la suficiente resistencia para ser manipulada en la construcción.			

* **Máximo tiempo de cerrado:** Es el tiempo medido desde que se ensambla el sustrato hasta la aplicación completa de la presión.

Fuente: Información del producto. AkzoNobel (2009).

4.3 Metodología

Los tablones y tablas adquiridos de Canelo y Fernán Sánchez, se someten a un proceso de secado artificial, mientras que el Pino es secado al ambiente. Posteriormente los tablones y tablas son procesados de tal manera que se obtengan listones de (1,8x6x190) cm para conformar vigas de 5 listones laminados horizontalmente.

En total se fabricarán 18 vigas divididas en:

Tabla 13. Distribución de vigas fabricadas.

Vigas	Láminas Continuas	Láminas empalmadas (Finger Joint)
Pino Insigne	3	3
Canelo	3	3
Fernán Sánchez	3	3

4.3.1 Proceso de secado

El proceso de secado al ambiente, consiste en apilar los tablones de madera y dejarlos secar por un período determinado de tiempo. Dependiendo de, la madera, las condiciones climáticas, el uso de separadores y el grosor de los especímenes, el tiempo de secado variará. En el caso de los tablones de Pino, se los deja reposar por un tiempo aproximado de 8-9 meses, en los cuales el contenido de humedad obtiene valores similares a la humedad de equilibrio (CHE) del lugar donde se encuentra. Finalmente, la madera se deposita en lugares techados para que alcance su punto de secado máximo. Este método se resume en costos bajos y tiempos largos de espera.



Figura 13. Secado natural del Pino.



Figura 14. Depósito bajo techo de la madera.

El secado artificial, por su lado, consiste en apilar las tablas y tablonés de madera dentro de un cuarto o cámara en la cual se pueden controlar, la temperatura, la humedad relativa del ambiente y la velocidad de circulación de aire, lo que permite obtener un contenido final de humedad de acuerdo a las especificaciones del cliente o del uso que se le vaya a dar al material. En este proceso, los tiempos de acondicionamiento varían dependiendo de la madera y de la temperatura regulada en la cámara de secado. Este método tiene la ventaja

de requerir un tiempo bajo de secado en comparación al secado natural de la madera, pero los costos incrementan. Para el Canelo y el Fernán Sánchez se seca los tablonés por un período de 23 días hasta alcanzar el contenido de humedad óptimo para la fabricación de MLE.



Figura 15. Cámara de secado artificial de la madera.



Figura 16. Apilado de la madera en la cámara de secado artificial.

4.3.2 Preparación de listones

Después del proceso de secado, los tablonos de madera se someten a un proceso de corte y escuadría para obtener el producto final que son listones de (1,8x6x200) cm. Todo este proceso se divide en varias etapas en donde la madera es canteada, reaserrada, cortada, cepillada y dividida en las dimensiones que se requieren.

- **Canteadora:** Es una máquina diseñada para nivelar y alisar tanto las caras como los cantos de los tablonos de madera. De esta manera se obtienen piezas de madera totalmente planas.



Figura 17. Máquina canteadora.

- **Reaserradera:** Los tablonos nivelados y alisados pasan a través de una cinta transportadora con una sierra al final que divide a los tablonos en dos tablas de la misma medida.



Figura 18. Máquina de reaseerrado.

- **Sierra Múltiple:** En esta máquina se le da el ancho exacto que se requiere a las láminas de madera (6 cm).



Figura 19. Sierra múltiple para madera.

- **Finger Joint:** Previo al proceso de cepillado, los listones pasan por la máquina que realiza los cortes en la testa para la unión dentada. Es importante resaltar que el grosor de los listones o láminas en este punto, debe ser mayor al grosor final de diseño ya que en el

proceso de prensado las uniones entre láminas siempre tienden a quedar con desniveles que se deben cepillar posteriormente.



Figura 20. Máquina para Finger Joint.

- **Moldurera:** El proceso de cepillado se lleva a cabo en la máquina moldurera. En esta etapa se delimita con precisión el grosor y ancho de los listones de acuerdo a las exigencias del proyecto. El cepillado se puede realizar tanto en las caras como en los cantos de las piezas.



Figura 21. Máquina moldurera.

- **Trozadora:** Finalmente las láminas de madera procesadas a partir de las tablas, se ingresan a la máquina de corte en la cual se puede definir el largo (190 cm) y se puede además escindir ciertos defectos en la madera, ya sean nudos o perforaciones en los extremos de las piezas.



Figura 22. Máquina trozadora.



Figura 23. Láminas continuas.



Figura 24. Láminas empalmadas.

4.3.3 Determinación del contenido de humedad

La norma chilena establece tres métodos para la determinación del contenido de humedad (CH) de las probetas o en este caso de los listones preparados. La primera norma, NCh 176/1, establece el cálculo del contenido de humedad a través del método de secado en estufa y el método de destilación que, por su parte, no es un método aplicable a cualquier contenido de humedad inicial ni a maderas con un contenido de sustancias volátiles.

El tercer método está regido por la norma NCh 2827, y es el que se usa en el presente estudio. Consiste en el uso de xilohigrómetros que pueden ser de conductividad o dieléctricos. Estos aparatos miden la conductividad iónica de la madera, cuando sus electrodos son clavados a un cuarto y un quinto del espesor, en el centro de la pieza y de manera contraria a las fibras; determinando así el contenido de humedad. Cabe mencionar que este método no es aplicable para humedades mayores al 25% por lo que se pueden presentar fallas en la lectura final.



Figura 25. Determinación de la humedad mediante xilohigrómetro.

Se determina el CH de cada una de las láminas a usarse en la fabricación de las 18 vigas laminadas. Tanto el Canelo como el Fernán Sánchez al ser sometidas a un proceso de secado artificial, presentan porcentajes de humedad entre el 9 y 11%, mientras que el Pino que tuvo un secado al ambiente de algunos meses, alcanza un contenido de humedad de equilibrio con el medio ambiente que lo rodea entre el 13 y 15%.

Tabla 14. Contenido de humedad para láminas de cada especie.

Lámina	Contenido de humedad (%)		
	Canelo	Fernán Sánchez	Pino
1	9,8	10,0	14,2
2	9,8	10,2	14,6
3	10,4	9,4	14,8
4	10,6	10,0	14,2
5	10,0	10,2	14,6
6	10,4	10,6	14,4
7	10,2	10,8	13,8
8	10,6	10,4	14,6
9	10,2	10,4	14,8
10	10,2	10,6	14,0
11	9,6	10,4	13,8
12	10,0	10,4	13,8
13	10,0	10,6	14,0
14	9,4	10,8	14,2
15	10,0	10,8	14,2
16	9,4	10,6	14,4
17	9,2	9,8	13,8
18	9,0	10,4	14,0
19	10,0	9,8	13,6
20	9,8	9,8	13,8
21	9,6	10,0	14,4
22	10,6	9,6	14,2
23	10,4	9,6	13,8
24	10,4	9,6	14,2
25	10,4	10,4	14,4
26	10,4	9,6	14,4
27	10,6	10,0	14,4
28	10,2	10,2	14,8
29	10,6	10,4	13,6
30	10,0	10,4	14,4
Promedio	10,1	10,2	14,2

4.3.4 Proceso de fabricación de las vigas

Como ya se mencionó, se fabrican un total de 18 vigas de las cuales, 9 son ensambladas con listones continuos y 9 son elaboradas a partir listones con uniones dentadas en puntos críticos de las vigas. Para obtener datos promedio, se elaboran 3 vigas para cada tipo de madera tanto con láminas continuas como con láminas acopladas.

Las dimensiones propuestas son (6x9x190) cm lo cual cumple con las especificaciones de la norma DIN-EN 408. La sección transversal de las vigas está compuesta por 5 láminas de 6x1,8 cm que son encoladas con adhesivo MUF de la empresa AkzoNobel.

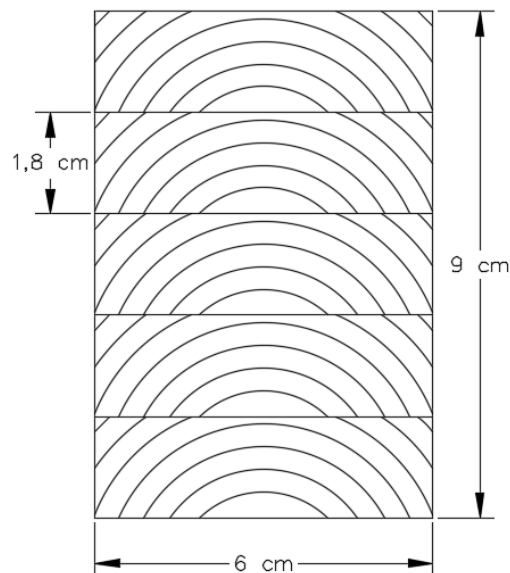


Figura 26. Sección transversal para las vigas MLE.

4.3.4.1 Características del Finger Joint

Para la fabricación de las 9 vigas que tienen listones acoplados mediante la técnica Finger Joint, se usa una longitud de dientes de 12 mm y una separación entre ellos de 5 mm. El corte es realizado en la cara de cada listón, es decir, se realiza un perfil de corte vertical.

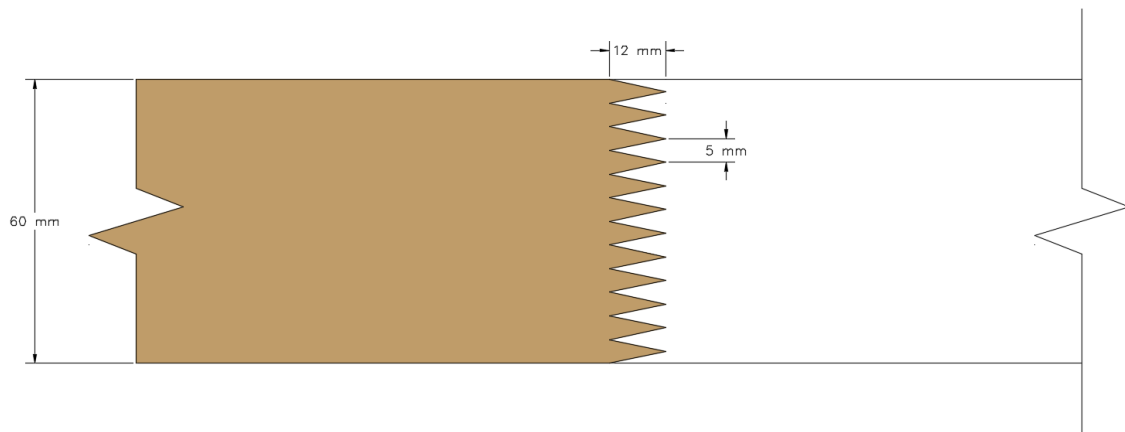


Figura 27. Vista en planta del corte Finger Joint.

Una vez que se realiza la técnica del corte dentado, se procede con la unión de cada una de las láminas de madera, regulando la presión aplicada. Dependiendo del tipo de madera, la presión a aplicarse varía entre 50 y 100 kg/cm², siendo la madera de Pino en la que menos presión se aplica y la de Fernán Sánchez la de mayor requerimiento.

El adhesivo que se usa en este proceso es el MUF, el tiempo de prensado es relativamente corto (2 s) y para este caso, se usa una prensa en frío. Finalmente, las láminas unidas pasan por la máquina moldurera para cepillar cualquier desnivel producido durante el prensado, y que no haya problema posteriormente para el encolado final.



Figura 28. Prensado del Finger Joint.

4.3.4.2 Encolado

El proceso de encolado se lo realiza en el menor tiempo posible debido a las características del pegamento. Al poseer un tiempo de vida 100 minutos y un tiempo máximo de ensamblaje de 110 minutos, se considera encolar y prensar en dos turnos diferentes las 18 vigas.

La relación adhesivo:catalizador que se utiliza es de 100:20, que es una relación bastante común y que puede prescindir del uso del agua en la mezcla. Por otra parte, la cantidad de encolado que se aplica en una sola cara de las uniones es de 450 g/m², lo que asegura una buena distribución del pegamento a lo largo de la viga.



Figura 29. Encolado de las láminas.

4.3.4.3 Prensado

De acuerdo a las especificaciones del adhesivo, el tiempo de prensado varía según la relación adhesivo:catalizador que se usa y en función de la temperatura de la línea de cola en la unión. Por otro lado, la presión mínima a aplicarse se rige al espesor y al tipo de madera usada.

En esta práctica se usa una prensa calibrada a 30° C y 40 kgf/cm² y se prensan las 9 vigas durante un periodo de tiempo de 3 horas que es el tiempo recomendado a esa temperatura. Por último, se deja reposar todos los especímenes durante 5 días, tiempo en el cual la línea de cola adquiere la suficiente resistencia para ser manipulada durante los ensayos de flexión.



Figura 30. Prensado de las vigas MLE.

4.4 Experimentos

El módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR), son dos de los conceptos más usados para determinar la capacidad resistente que posee una viga estructural. Para determinar cada uno de ellos, se usa el ensayo de flexión estática de cuatro puntos, en el cual, a un elemento estructural se le aplica una carga constante en dos puntos ubicados a cierta distancia de los apoyos.

Mediante la curva fuerza-deformación se puede obtener datos de los rangos elástico e inelástico, la fuerza de rotura y deformación máxima que sufren los especímenes. A partir de las fórmulas establecidas en la norma DIN EN 408 se podrán calcular los valores exactos de esfuerzos para cada viga.

Según lo establecido en la norma alemana, la longitud de las vigas debe ser al menos 19 veces la altura de la sección transversal, y la longitud del vano deber ser de 15 a 21 veces la altura de la viga. La distancia entre cargas aplicadas tendrá que ser 6 veces la altura de la viga y por último la distancia de la testa al apoyo deberá ser mayor o igual a 0,5 veces la altura.

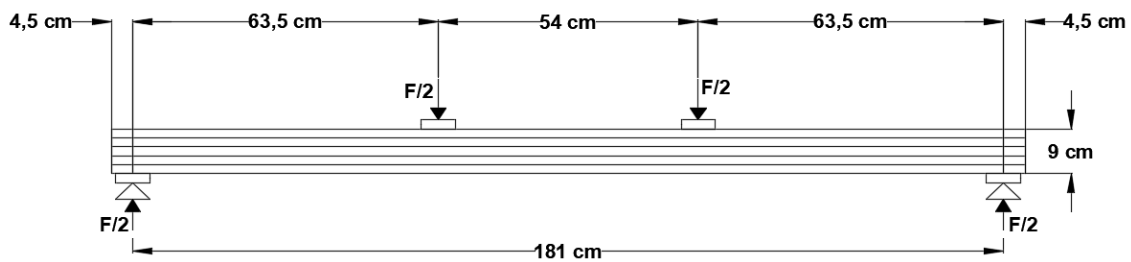


Figura 31. Disposición de cargas y apoyos en vigas con láminas continuas.

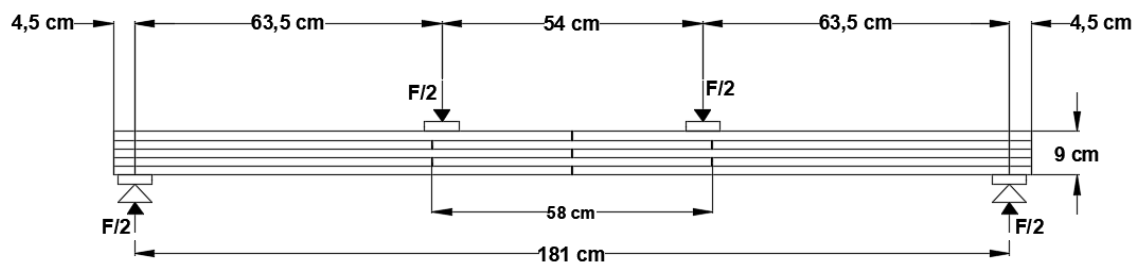


Figura 32. Disposición de cargas y apoyos en vigas con láminas empalmadas.

Debido a la longitud de 1,90 m de todas las vigas, se acopla una viga IPN de 2 m de largo que sirve de apoyo del espécimen elaborado. De igual manera para poder simular la acción de doble carga en el ensayo de flexión, se utiliza una viga UPN con dos tacos de madera ubicados a 54 cm entre ellos. La máquina se programa para estas distancias y además se establece una tasa de velocidad constante, para la carga, de 12 mm/min.

En este ensayo, el software de la computadora que controla todo el proceso, registra la fuerza y la deformación cada 0,01 s. Para la determinación del MOE se necesita la deformación en el centro de la viga, por lo que se registra la deformación de la viga con la ayuda de una regla graduada y un dispositivo conectado a la parte superior de la viga; todo esto para constatar los resultados de deformación obtenidos en el software.



Figura 33. Ensayo a flexión viga de Canelo con láminas continuas.

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se analizan y discuten todos los procesos y resultados al momento de comprar, fabricar y romper las vigas de madera laminada. Por lo tanto, se realiza una comparación de los costos, propiedades físicas y finalmente las propiedades mecánicas de la madera usada en el presente trabajo.

5.1 Costos

En el mercado local, se vende gran variedad de madera, ya sea del oriente, sierra o costa ecuatoriana. El precio de cada pieza de madera dependerá de muchos factores tales como humedad, preparación, acabados, cepillado, tipos de secado y presentación de la muestra.

Para este estudio de investigación se compraron tablones de madera en estado seco es decir con una humedad entre el 8 y 15%. Los precios que se detallan a continuación son los precios al por mayor de tablones de Pino Insigne, Canelo y Fernán Sánchez, en estado seco y sin ningún tipo de preparación extra como cortes, cepillado, canteado, etc.

Tabla 15. Precio por metro cúbico de la madera seca.

Especie	Dimensión (Largo x ancho x espesor)	Precio Tablón	\$/m ³
Pino Insigne	290 x 21 x 4,5 cm	\$9	328
Canelo	290 x 21 x 4,5 cm	\$12	438
Fernán Sánchez	240 x 21 x 4,5 cm	\$10	441

De acuerdo con la Tabla 15, las maderas de Fernán Sánchez y Canelo bordean el mismo precio para un metro cúbico de material. Por otro lado, el Pino Insigne exhibe el precio más económico. La procedencia y la cantidad de ojos y defectos que posee el Pino, hace de su madera un material menos vistoso, por lo que sus precios son menores en comparación con otras maderas.

5.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de la madera usada, son todas aquellas que resultaron de los procesos previos a los ensayos de flexión de las vigas. Estas propiedades cumplen un rol muy importante en el control de calidad de las vigas e influirán en gran medida en la capacidad de resistencia de las mismas; por lo que, el proceso de determinación de estas características debe ser lo más estricto posible.

5.2.1 Clasificación visual

5.2.1.1 Pino Insigne (NCh 2150)

La norma NCh 2150 permite clasificar a la madera en dos Grados, A y B, mediante una clasificación estructural mecánica y una clasificación estructural visual. Se determinó el grado de la madera mediante las consideraciones generales establecidas en la Tabla 7 y además a través de la clasificación visual detallada en la Tabla 9.

- **Consideraciones generales**

Como primer apartado se determinó los alabeos presentes en cada uno de los 30 listones a usarse en la elaboración de las vigas laminadas. Entendiéndose por acanaladura como el alabeo producido en el eje longitudinal de la pieza, arqueadura como el alabeo ocurrido en el eje tangencial y encorvadura como el alabeo presente en el eje radial del listón. Finalmente, la torcedura se refiere a la falta de escuadría en los extremos de las tablas.

Debido a que cada uno de los listones pasó por el proceso previo de sierra múltiple y moldurado, ninguno de ellos presentó alabeos en su estructura por lo que cumplen con esta consideración.

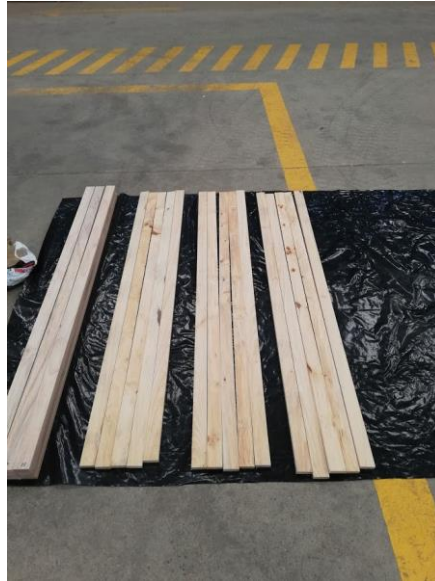


Figura 34. Disposición de los listones continuos de Pino Insigne.

En cuanto al contenido de humedad, manchas, médulas, pudrición, perforación y la presencia de resina, las láminas de Pino cumplen con las consideraciones generales, por lo que son aptas para su uso en vigas MLE.

- **Especificaciones para grados definidos**

Al no poseer agujeros, resinas, manchas, pudrición, grietas, bolsillos ni desviación de la fibra, los únicos indicadores para el Grado perteneciente a la madera son los nudos y la velocidad de crecimiento de los anillos del material. Debido a la complejidad para determinar la velocidad de crecimiento, se optó por clasificar a la madera según las magnitudes de sus nudos.

Como se puede observar en las Figuras 33 y 34, 3 de las láminas contenían nudos de aproximadamente 6 cm por tanto se las desecharon. Por otro lado, alrededor de la mitad de láminas poseían nudos separados entre 15 y 30 cm y con una magnitud de 1 cm en su mayoría (Figura 35), lo que clasificaría a la madera en el Grado A. Sin embargo, existen nudos que bordean magnitudes de 3 a 4 cm por lo que la sumatoria tomada en intervalos de 6 cm situaría al Pino de esta práctica en el Grado B.



Figura 35. Defectos en los listones de Pino Insigne.



Figura 36. Dimensión de los nudos de Pino Insigne.

5.2.1.2 Canelo (NCh 1970)

La norma chilena NCh 1970, detalla los requerimientos para especies de madera latifoliadas en las Tablas 2, 3, 4, 5 y 6. Para esta norma, se clasificó a la madera en un intervalo de cuatro grados dependiendo de sus características físicas.

- **Especificaciones generales**

Las piezas obtenidas a partir de los tablones de Canelo, como se mencionó anteriormente, fueron sometidas a un proceso de secado, canteado, reaserrado y moldurado, por lo que cumplen con las especificaciones generales descritas en la norma NCh 1970. Es decir, tanto las dimensiones como la humedad y el estado de los listones, estuvieron de acuerdo a las necesidades del proyecto dentro de los rangos propuestos en un principio.

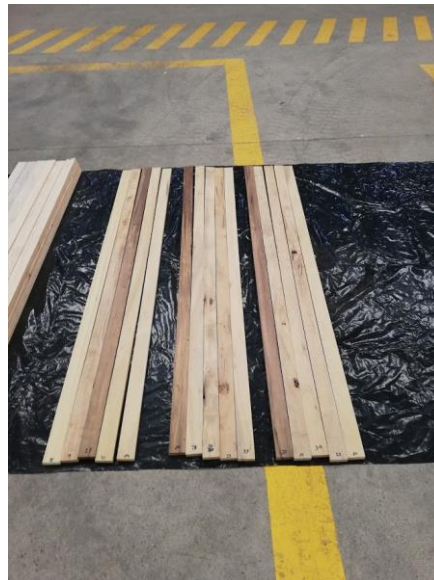


Figura 37. Disposición de los listones de Canelo.

- **Especificaciones particulares**

- La madera de Canelo procesada no presentó evidencias de perforación ni de pudrición.
- En cuanto a la presencia de corteza, se constató que después del moldurado las piezas queden completamente libres de corteza.
- Las piezas de Canelo, además, no presentan bolsillos, aristas faltantes, acebolladuras, grietas ni rajaduras por lo que el proceso de clasificación será únicamente por la magnitud de los nudos presentes.
- Los listones, al igual que en el Pino, en su mayoría no presentan nudos, pero al ser una viga formada por la unión de varios listones, se le asignará a la misma, el grado del listón más desfavorable. Como puede observarse en la Figura 37, los nudos oscilan entre 1 y 2 cm en el peor de los casos, por tanto, se clasifica al Canelo como Grado N°3.



Figura 38. Defectos en los listones de Canelo.

- Gracias a los procesos de moldurado y cortado, ninguna de las piezas presentó problemas por alabeo o torcedura descritos en las Tablas 4 y 6.

5.2.1.3 Fernán Sánchez (NCh 1970)

- **Especificaciones generales**

Al igual que el Pino y el Canelo, todas las piezas de la madera Fernán Sánchez pasaron por el proceso necesario para cumplir con las especificaciones generales detalladas en la norma NCh 1970.



Figura 39. Disposición de los listones de Fernán Sánchez.

- **Especificaciones particulares**

- La Figura 38, evidencia que las piezas no contienen perforaciones, pudrición o madera de reacción.
- La corteza presente en las láminas, fue despojada durante el proceso de moldurado.

- La madera de Fernán Sánchez es conocida por la presencia casi nula de nudos, por tanto, es necesario enfocarse en otros defectos posibles que tenga en su superficie, para conseguir una correcta clasificación.



Figura 40. Defectos en los listones de Fernán Sánchez.

- Al no evidenciarse defectos descritos en la Tabla 2, todos los elementos de esta madera pertenecen al Grado N°1 siendo este el grado óptimo para trabajar con vigas de madera laminada.

5.2.2 Humedad

La humedad determinada a partir del xilohigrómetro, tuvo variaciones de hasta 1,6 % entre láminas de cada madera, esto quiere decir que los tablonos tuvieron un proceso de secado monitoreado correctamente y durante un lapso de tiempo adecuado para que la humedad sea constante a lo largo y ancho de cada uno de los tablonos. Además, según la norma Nch 2148, como requisito general en MLE, la variación del contenido de humedad, a lo largo de una lámina o entre láminas adyacentes de la viga, no deberá sobrepasar el 4%, por lo que se cumple con estos criterios.

Tabla 16. Contenido de humedad promedio

Especie	Contenido de humedad promedio (%)	Variación máxima (%)
Pino Radiata	14,2	1,2
Canelo	10,1	1,6
Fernán Sánchez	10,2	1,4

Como se puede observar, el contenido de humedad promedio, tanto en el Canelo como en el Fernán Sánchez resultó menor y mucho más apropiado, ya que se usó un horno de secado artificial en el cual se pueden controlar la temperatura, la humedad relativa y la ventilación. La humedad resultante de la madera de Pino, se mantuvo en un rango superior a las otras maderas, ya que, tuvo un secado natural en el cual no se pueden controlar las condiciones del ambiente para un secado óptimo. De todas maneras, la humedad del 14% es aceptada por la norma NCh 2150 para la elaboración de las vigas.

5.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de las vigas MLE, fueron clasificadas según la disposición de los listones que conforman cada una de las probetas. Es decir, se determinaron los valores de módulo de elasticidad y módulo de ruptura para las vigas formadas a partir de listones continuos y por otro lado, para las vigas con listones empalmados.

5.3.1 Módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) en vigas con listones continuos

Después de ensayar los 9 elementos a flexión, la Tabla 17 y la Figura 40, detallan las dimensiones de cada probeta, así como los valores de resistencia obtenidos a través de la prensa SHIMADZU.

Tabla 17. Dimensiones y resultados para MOE y MOR de vigas con listones continuos.

Especie	Probeta	l [mm]	b [mm]	h [mm]	F2-F1 [N]	w1-w2 [mm]	F _{máx} [N]	Δ máx [mm]	MOE [MPa-N/mm ²]	MOR [MPa-N/mm ²]
Pino Insigne	1	1810	57,20	94,90	6000	13,01	12558,60	27,38	12306,98	46,44
	2	1810	57,75	94,05	8000	16,80	10139,80	22,60	12930,75	37,81
	3	1810	58,23	94,80	8000	17,68	10396,60	21,49	11896,83	37,85
Canelo	1	1810	56,93	85,47	8000	22,53	12968,70	40,23	13028,31	59,40
	2	1810	57,33	85,30	8000	22,86	11470,80	33,95	12826,59	52,39
	3	1810	57,20	86,33	2000	7,37	4822,10	17,09	9615,44	21,55
Fernán Sánchez	1	1810	58,00	91,58	8000	16,51	13565,70	27,51	14189,60	53,13
	2	1810	57,58	91,18	8000	17,66	17751,40	41,33	13535,38	70,65
	3	1810	58,25	90,93	8000	16,69	13598,80	28,28	14276,25	53,79

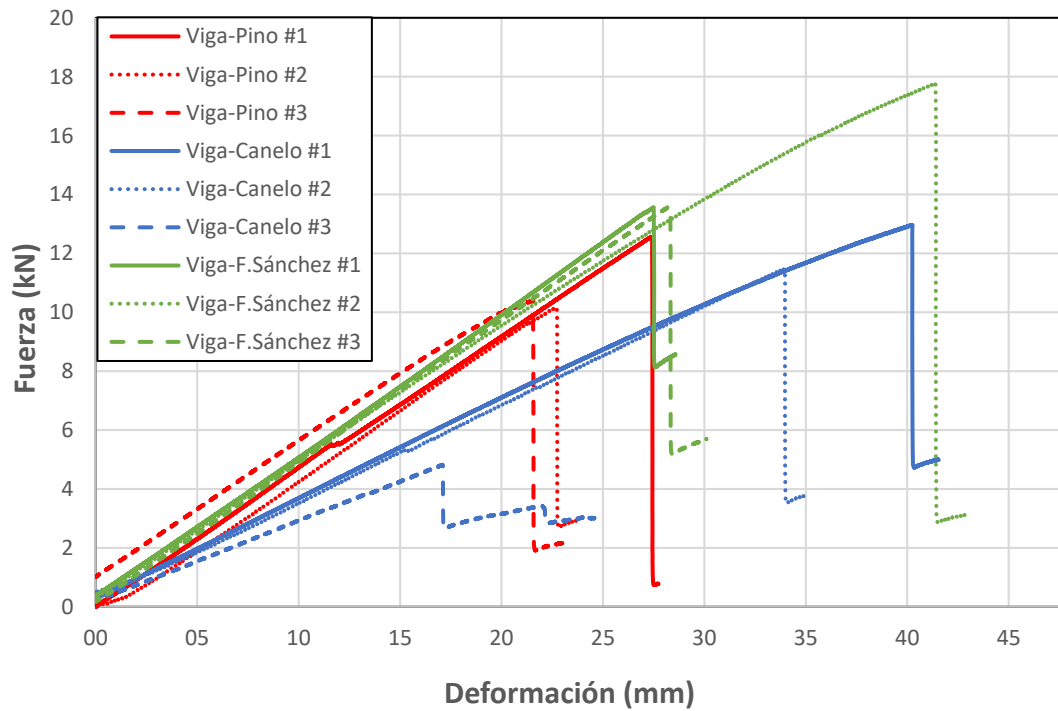


Figura 41. Gráfica fuerza-deformación para vigas con listones continuos.

Como se puede observar, no todas las vigas tuvieron las medidas deseadas (6x9x190) cm debido a que se pierden milímetros de material al cepillar las vigas para un mejor acabado y para eliminar los restos del pegamento utilizado durante el proceso de fabricación. Estos milímetros de diferencia tienen que ser debidamente anotados ya que pueden variar significativamente los valores del módulo de elasticidad y del módulo de ruptura.

La viga de Canelo #3, como se observa en la Figura 40, tuvo un colapso prematuro a los 80 s de haber iniciado el ensayo. Los datos de deformación y fuerza máxima están alejados de las otras dos muestras. La probeta tuvo una delaminación temprana por una aplicación deficiente del encolado, por lo que esta probeta será descartada para el análisis posterior que se realizará para cada tipo de madera. (Anexos 3)

Tabla 18. Valores promedio para vigas con listones continuos.

Vigas	F _{máx} [N]	Δ máx [mm]	MOE [MPa-N/mm ²]	MOR [MPa-N/mm ²]
Pino Insigne	11031.67	23.82	12378.18	40.70
Canelo	12219.75	37.09	12927.45	55.90
Fernán Sánchez	14971.97	32.37	14000.41	59.19

La Tabla 18 presenta los resultados promedio de MOE y MOR, para cada especie de madera. Los datos presentados, indican que la madera de Fernán Sánchez fue la más resistente y rígida en promedio de las maderas ensayadas. Su módulo de ruptura fue un 45% y 6% superior al módulo de ruptura del Pino y del Canelo respectivamente. En cuanto al MOE, las vigas de Fernán Sánchez fueron un 13% y 8% más rígidas que las de Pino y Canelo respectivamente.

Se evidencia, además, que las vigas de Canelo alcanzaron una mayor deformación, es decir, los elementos resultaron mucho más flexibles que los otros dos materiales. Si bien una menor rigidez implica un menor módulo de elasticidad, la fuerza máxima, que llegó a romper las vigas en el Canelo, fue superior a la fuerza en los ensayos con Pino. Además, se debe considerar que el peralte en las vigas de Canelo resultó 9 mm inferior al peralte de las vigas de Pino, por lo tanto, el MOE del Canelo alcanzó mayores valores.

Debido a las diferencias milimétricas que existen en las secciones transversales de cada una de las probetas ensayadas, los porcentajes de diferencia entre módulos de ruptura y fuerzas máximas, entre cada tipo de madera, no van a ser los mismos. Por lo que, si por un lado se tiene que la diferencia de MOR fue de un 45% y un 6% a favor del Fernán Sánchez, por otro lado, la superioridad del Fernán Sánchez en fuerza máxima es de un 36% y un 23% respecto al Pino y al Canelo respectivamente.

En el Anexo 1 se detallan, viga por viga, los resultados y gráficas obtenidos de la prensa de flexión SHIMADZU del Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Anexo 1: Gráficas y valores obtenidos para MOE y MOR a través de la prensa SHIMADZU. (Vigas con listones continuos)

5.3.2 Módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) en vigas con listones empalmados (Finger Joint)

La Tabla 19 y Figura 41 exponen las dimensiones y los valores de resistencia obtenidos para el segundo grupo de vigas ensayadas. Se procedió de la misma manera que con las vigas continuas, aplicando fuerza a velocidad constante, hasta el colapso de la probeta.

Tabla 19. Dimensiones y resultados para MOE y MOR de vigas con listones empalmados.

Especie	Probeta	l [mm]	b [mm]	h [mm]	F2-F1 [N]	w1-w2 [mm]	Fmáx [N]	Δ máx [mm]	MOE [MPa-N/mm ²]	MOR [MPa-N/mm ²]
Pino Insigne-FJ	1	1810	58,50	87,10	3000	12,25	5927,09	26,43	8259,83	25,44
	2	1810	57,73	91,75	4000	11,58	6770,45	33,29	10106,37	26,54
	3	1810	58,08	86,95	3000	12,77	5666,73	26,22	8025,73	24,59
Canelo-FJ	1	1810	57,98	88,53	4000	10,32	8071,26	26,95	12570,71	33,84
	2	1810	58,28	85,33	3000	9,35	6486,26	24,65	11558,99	29,12
	3	1810	58,65	83,70	4000	12,01	5901,97	18,41	12630,80	27,36
Fernán Sánchez-FJ	1	1810	58,10	86,98	5000	12,32	6802,88	17,13	13843,39	29,49
	2	1810	58,75	87,40	7000	17,37	9181,66	22,87	13401,28	38,97
	3	1810	58,58	87,63	5000	12,67	7699,97	20,63	13061,52	32,61

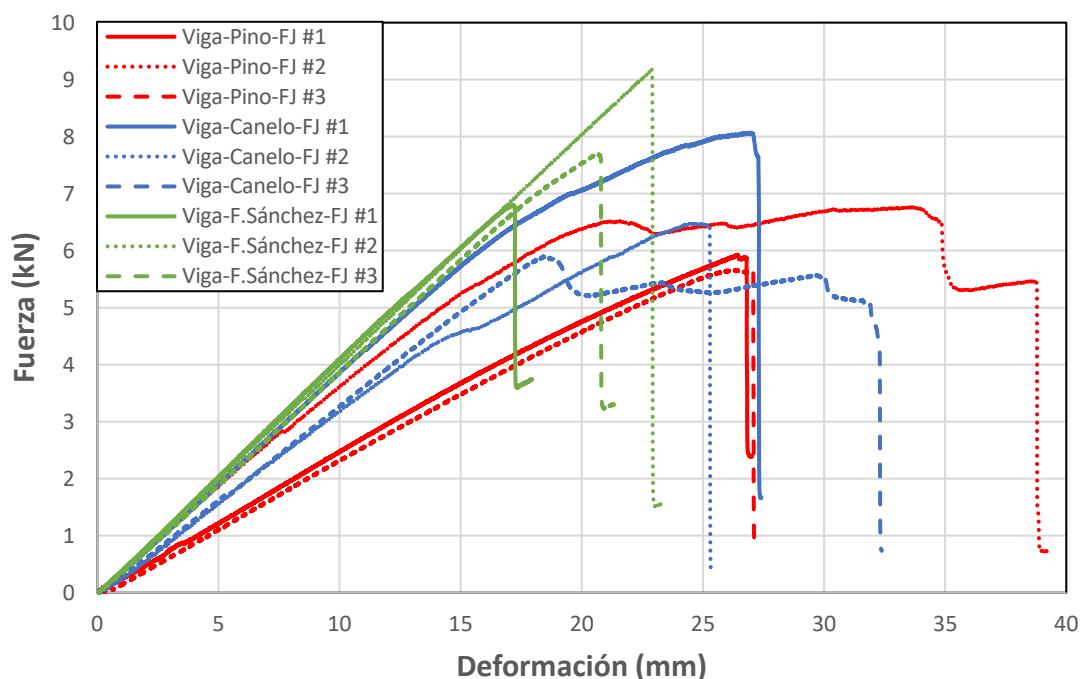


Figura 42. Gráfica fuerza-deformación para vigas con listones empalmados.

Las dimensiones correspondientes a la altura de cada probeta resultaron ligeramente inferiores a las dimensiones de las vigas continuas. Esto se produjo ya que al momento de realizar las uniones Finger Joint, quedó un pequeño desnivel en la sección de empalme, por lo que se optó por moldurar nuevamente la pieza para obtener una superficie totalmente lisa para el encolado y pegado.

La Figura 41 muestra que 2 de las 9 probetas tuvieron un rango plástico. En el caso de la muestra #2 de Pino, se tomó como fuerza y desplazamiento máximo los valores de 6770 kN y 33,29 mm respectivamente, ya que la curva plástica fue incrementándose. Por el contrario, en la muestra #3 de Canelo, los valores usados para los cálculos fueron de 5901 kN y 18,41 mm puesto que la curva plástica fue en decadencia.

Tabla 20. Valores promedio para vigas con listones empalmados.

Vigas	F _{máx} [N]	Δ máx [mm]	MOE [MPa-N/mm ²]	MOR [MPa-N/mm ²]
Pino Insigne-FJ	6121,42	28,65	8797,31	25,52
Canelo-FJ	6819,83	23,34	12253,50	30,11
Fernán Sánchez-FJ	7894,84	20,21	13435,40	33,69

Los valores promedio en cada tipo de madera, demuestran que, en las vigas con listones empalmados, nuevamente las de Fernán Sánchez fueron las más rígidas y resistentes. Su MOR fue un 32% y 12% mayor, y su MOE obtuvo un 53% y 10% de superioridad frente a los valores obtenidos en el Pino y Canelo respectivamente. Sin embargo, en la tabla 20 se puede distinguir que, en promedio, las vigas de Fernán Sánchez fueron las más frágiles debido a su deformación vs fuerza.

Por otra parte, las deformaciones máximas alcanzadas en este ensayo, determinaron una mayor flexibilidad en las muestras de Pino, que, combinada con la fuerza máxima de la prueba, condujo a un MOE inferior en este tipo de madera. Las deformaciones máximas, en contraste con las vigas con listones continuos, tienen diferencias que a decir verdad no son significativas, ya que se está hablando de 8 mm de variación entre el Pino y el Fernán Sánchez.

El porcentaje de variación, respecto a las fuerzas máximas producidas durante la prueba, fue un 29% de incremento de las vigas de Pino a las de Fernán Sánchez y de un 16% de las vigas de Canelo a las de Fernán Sánchez. De la misma manera que sucedió con el otro lote de vigas, este porcentaje varió en comparación con el porcentaje del módulo de ruptura, ya que no todas las vigas poseían exactamente las mismas dimensiones.

ANEXO 2: Gráficas y valores obtenidos de MOE y MOR a través de la prensa SHIMADZU. (Vigas con listones empalmados)

5.3.3 Análisis comparativo entre vigas con listones continuos y vigas con listones empalmados.

A continuación, se detalla el análisis comparativo entre las vigas con láminas continuas y las vigas con láminas empalmadas. Se determinó la relación de MOE y MOR entre vigas con láminas empalmadas y continuas. Las Figuras 42 y 43 y la Tabla 21, exponen dichos porcentajes de relación y las diferencias entre cada ensayo.

Tabla 21. Relación de MOE y MOR entre vigas con listones continuos y vigas con listones empalmados.

Vigas MLE				
	Especie	Listones Continuos [MPa]	Listones Finger Joint [MPa]	Relación (%)
Módulo de Elasticidad (MOE)	Pino Insigne	12378,18	8797,31	71,07
	Canelo	12927,45	12253,5	94,79
	Fernán Sánchez	14000,41	13435,4	95,96
Módulo de Ruptura (MOR)	Pino Insigne	40,7	25,52	62,71
	Canelo	55,9	30,11	53,87
	Fernán Sánchez	59,19	33,69	56,92

Módulo de Elasticidad (MOE)

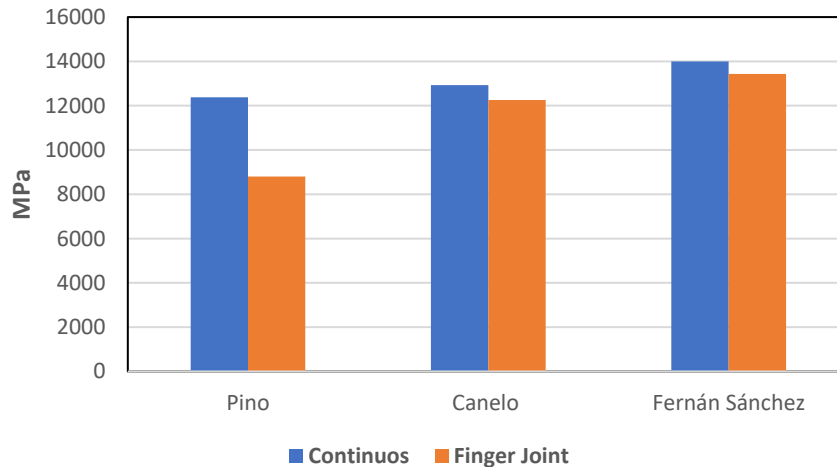


Figura 43. Diferencias del MOE entre vigas con listones continuos y empalmados.

Módulo de Ruptura (MOR)

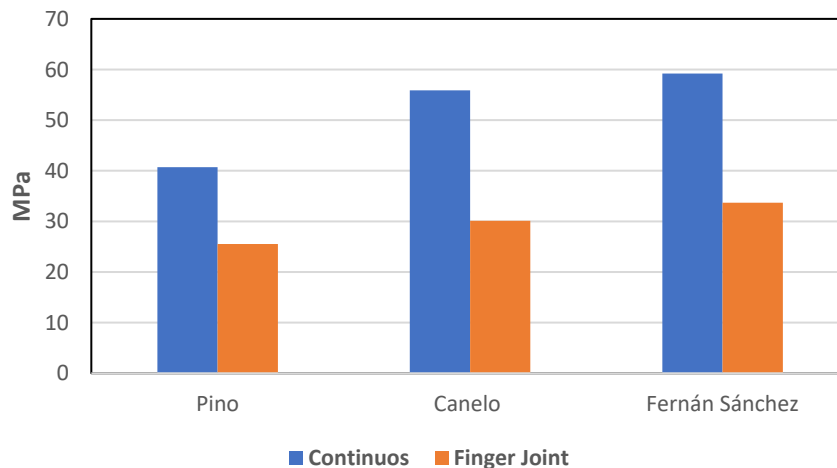


Figura 44. Diferencias del MOR entre vigas con listones continuos y empalmados.

Los valores obtenidos en la Tabla 21, indican que las vigas de Canelo y Fernán Sánchez, elaboradas a partir de piezas unidas mediante la técnica Finger Joint, presentaron valores entre el 95% y 96% del MOE obtenido en vigas con piezas continuas. Esto quiere decir que la rigidez, en estos elementos, apenas disminuyó un 5% y por lo tanto se considera que el Finger Joint, en estas vigas, no afectará a la capacidad de servicio.

Por otra parte, las vigas de Pino Insigne, redujeron su módulo de elasticidad un 29% al aplicar las uniones dentadas en los listones. Esto, evidentemente demuestra que se complicará la capacidad de servicio de la estructura, al tener una mayor flexibilidad.

En cuanto a la resistencia a la flexión o módulo de ruptura (MOR), se evidencia que, en promedio, las vigas-FJ de los tres tipos de madera alcanzaron un 57% respecto a las vigas de piezas continuas. Esto se vio reflejado en las fuerzas máximas que se produjeron durante los dos ensayos.

Si bien el MOE indica que las vigas no perderán su capacidad de servicio en el rango lineal elástico, al ser fabricadas con listones empalmados; el MOR por otro lado, concluye que las probetas-FJ serán un 43% menos resistentes en flexión, lo que afectará a las condiciones de seguridad de la obra al tener un rendimiento mecánico por debajo de lo esperado.

5.3.4 Mecanismos de falla

Después de haber ensayado un total de 18 vigas, se procedió a determinar el mecanismo de falla de cada una de estas. Las fallas ocurridas sobre las vigas, pueden clasificarse de acuerdo a la forma en que se desarrollan. Es por esto que se encontraron fallas por tensión, compresión y corte horizontal. Además, existió un cuarto tipo de falla que se observó a partir del desprendimiento de las uniones dentadas.

Tabla 22. Tipos de falla en las vigas ensayadas.

Especie	Probeta	Tensión	Corte horizontal	Desprendimiento en las uniones	Compresión
Pino Insigne	1	x			
	2				x
	3	x			
Canelo	1		x		
	2		x		
	3		x		
Fernán Sánchez	1		x		
	2	x			
	3		x		
Pino Insigne_FJ	1				x
	2	x			
	3			x	
Canelo_FJ	1			x	
	2	x			
	3			x	
Fernán Sánchez_FJ	1	x			
	2	x			
	3	x			

- **Falla por tensión**

Este tipo de falla empieza con una grieta producida en la parte inferior de la viga, la cual se extiende hacia las láminas superiores y provoca el fracaso en la viga. Fue el tipo de falla más común en los ensayos, ya que se registraron un total de 8 vigas (44%), con fractura por tensión.



Figura 45. Falla por tensión, viga Pino Insigne #1.

- **Falla por corte horizontal**

En este caso existe una falla por deslizamiento/delaminación, en una parte de la longitud total. Puede ocurrir en uno o ambos extremos a la vez. Un total de 5 vigas (28%) presentaron este tipo de falla, empezando por una delaminación que terminó en una línea que atravesó parte del listón.



Figura 46. Falla por corte horizontal, viga Canelo #2.

- **Falla por desprendimiento en las uniones**

Esta falla comienza en la unión de una de las piezas inferiores, sometidas a tensión, de la viga, y posteriormente se extiende a hacia las piezas superiores provocando el colapso del elemento. Se contabilizaron 3 especímenes con esta falla (17%).



Figura 47. Falla por desprendimiento en las uniones, viga Canelo-FJ #1.

- **Falla por compresión**

Son fallas ocurridas en la parte superior de la viga, después de haber alcanzado el límite elástico, y se extienden hacia abajo pudiendo alcanzar el eje neutro de la viga. Únicamente 2 de las 18 probetas (11%) mostraron este tipo de falla.



Figura 48. Falla por compresión, viga Pino Insigne-FJ #1

5.3.5 Cuantificación de los valores de resistencia obtenidos según la norma DIN EN 1194:1999 (Timber structures. Glued laminated timber. Strength classes and determination of characteristic values)

La norma DIN EN 1194:1999 establece cuatro rangos para la clasificación de vigas MLE según sus valores de resistencia. Se tomará el módulo de elasticidad (MOE) como valor característico para la clasificación de cada especie maderera ensayada.

Tabla 23. Clases resistentes según DIN EN 1194.

Clase Resistente	GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h
Módulo de Elasticidad [MPa]	11600	12600	13700	14700

Fuente: DIN-EN 1194:1999 "Timber structures. Glued laminated timber. Strength classes and determination of characteristic values".

Según lo expuesto en la Tabla 22, las clases resistentes para las vigas de Pino, Canelo y Fernán Sánchez son las siguientes:

Tabla 24. Clases resistentes del ensayo.

Vigas	Clase Resistente
Pino	GL 24h
Canelo	GL 28h
Fernán Sánchez	GL 32h
Pino-FJ	N/A
Canelo-FJ	GL 24h
Fernán Sánchez-FJ	GL 28h

Las vigas MLE de Pino con uniones dentadas, no obtuvieron la suficiente resistencia como para ser clasificadas según la norma DIN EN 1194. Su módulo de elasticidad promedio (8797 MPa) está muy por debajo de la mínima clase resistente (11600 MPa) establecida en la Tabla 22.

Por otra parte, las demás vigas encajaron en alguna de las clases resistentes propuestas, y se determinó que las vigas de Fernán Sánchez tanto de listones continuos como de listones empalmados, consiguieron una mejor clase que el Canelo y el Pino respectivamente. Sin embargo, las vigas de Fernán Sánchez con listones empalmados, a pesar de poseer una clase estructural GL 28h, fueron más frágiles que las demás vigas por lo que tendrían limitaciones para ser usadas como elementos estructurales.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se detallan las conclusiones y recomendaciones en base a los resultados expuestos en el proyecto. Se responde a los objetivos propuestos y se propone trabajos y temas de investigación que complementen los datos obtenidos en este trabajo.

6.1 Conclusiones

- El estudio de las vigas de madera laminada se centra básicamente en las cualidades que posee un elemento de estos, frente a vigas de madera sólida de mayor densidad. En el país, como elementos estructurales, son bien conocidas las vigas sólidas de madera dura como: Yumbingue, Teca, Roble, Eucalipto, etc. En este proyecto se optó por la laminación de maderas con densidades menores, para verificar la resistencia de elementos MLE.
- El proceso de obtención de la materia prima, previo a la elaboración de vigas laminadas, debe ser muy riguroso. La madera, a ser usada, debe ser seleccionada de tal manera que se garantice el buen estado del producto y que posea las especificaciones necesarias del proyecto. Uno de los procesos primordiales en esta etapa, es el secado de la madera; se comprobó que el secado natural no certifica una humedad óptima de la madera y que necesita de mucho tiempo, dependiendo de la especie maderera, para alcanzar las humedades deseadas. Por otro lado, el secado artificial, a pesar de incrementar el costo, reduce significativamente el tiempo de espera y garantiza la humedad requerida para el proyecto.
- La clasificación, preparación, encolado y prensado de las láminas son los procesos subsiguientes a tener en cuenta sobre todo en las especificaciones. La clasificación visual, la simetría de las piezas, la elaboración del Finger Joint, el tipo de adhesivo y el prensado, son

aspectos muy influyentes en las propiedades mecánicas del producto final.

- La viga de Canelo #3 claramente tuvo un mal proceso de fabricación ya que tuvo una delaminación temprana. Esto sucede cuando no se obtiene un elemento totalmente compacto, es decir, que todas sus caras estén debidamente pegadas. El motivo de la delaminación temprana puede ser debido a un exceso de presión o una deficiente aplicación del adhesivo.
- Los valores de resistencia MOE y MOR en vigas elaboradas a partir de listones continuos y empalmados, concluyen que, efectivamente, las fabricadas a partir de la madera Fernán Sánchez, son las más resistentes y rígidas. Esto, comparando con la densidad de cada madera ensayada, comprueba que, las propiedades mecánicas están estrechamente relacionadas con la densidad.
- La técnica de empalmes (Finger Joint), usada en las láminas del segundo lote de vigas, consiguió valores del módulo de elasticidad cercanos a los obtenidos en los ensayos con vigas de láminas continuas para el Canelo y Fernán Sánchez. Sin embargo, su módulo de ruptura se redujo en un 43%, lo que significa que las vigas-FJ serán menos resistentes a flexión y no pueden ser consideradas de la misma clase resistente que las vigas con láminas continuas. En cambio, las vigas de Pino-FJ sufrieron reducciones considerables en sus resistencias MOE y MOR, provocando así una diferencia en su capacidad de servicio y en su rendimiento mecánico respecto a las vigas con láminas completas.
- En las vigas con uniones Finger Joint, se evidenció que los elementos de Fernán Sánchez tuvieron un comportamiento frágil, mientras que las vigas de Pino consiguieron comportamientos dúctiles. Las probetas de Fernán Sánchez-FJ, claramente estarán limitadas para su uso estructural por su relación fuerza-deformación.

- Pese a todas las diferencias existentes entre las vigas continuas y las vigas empalmadas, 15 de las 18 vigas resistieron lo suficiente como para ser clasificadas dentro de la norma DIN EN 1194 como elementos estructurales para diferentes obras ingenieriles. Las únicas que no lo consiguieron fueron las vigas de Pino-FJ que, con sus 8797 MPa promedio de módulo de elasticidad, quedaron por debajo de la clase resistente, más baja, establecida.
- Se concluye, por lo tanto, que la técnica del Finger Joint, redujo el rendimiento mecánico y la capacidad a flexión de las vigas (MOR). En 3 de los casos el mecanismo de falla se produjo en las uniones Finger Joint afectando a las láminas superiores e inferiores. Los valores de MOE y MOR en estos casos, fueron aun menores. El proceso de corte y unión de los dientes en las láminas debe ser realizado con mucho juicio para evitar este tipo de errores.
- Finalmente, con base en los resultados de costos y propiedades mecánicas de los 3 tipos de madera ensayada, se destaca el uso de la madera de Fernán Sánchez por su rigidez y resistencia por sobre la madera de Canelo ya que prácticamente bordean el mismo precio. En cuanto a la madera de Pino, al ser una madera mucho más barata y menos densa, sus valores de resistencia fueron un 13% y 45% inferiores en MOE y MOR respectivamente, respecto a la madera de Fernán Sánchez. Dependiendo de las necesidades del proyecto se determinará el uso ya sea de Fernán Sánchez o de Pino, siendo esta última una gran opción debido a su bajo costo.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda analizar las propiedades físicas y mecánicas de vigas de madera laminada con otras especies forestales de densidad mediana o baja en el país, para así poder realizar una comparación costo/eficiencia con las vigas de Fernán Sánchez y de Pino.
- Todo el proceso de fabricación de los productos MLE debe ser minuciosamente controlado. Se recomienda hacer una clasificación visual o mecánica detallada, una preparación correcta de las láminas, un proceso de encolado eficiente y un prensado adecuado para poder obtener el producto de la mejor calidad posible. Se recomienda un especial cuidado en la técnica del Finger Joint (altura, profundidad, ancho y encolado) ya que las vigas pueden fallar repentinamente en sus puntos críticos, convirtiéndolas en elementos no confiables.
- Se recomienda que en próximos estudios se contemple siempre el uso de madera de rápido crecimiento. Como bien se sabe, los árboles que producen madera dura de densidad alta, son los que más tardan en crecer, por lo que su incorporación en vigas MLE no sería un proceso renovable ni amigable con el medio ambiente. Por otro lado, las maderas de crecimiento rápido podrán ser cultivadas en plantaciones forestales con manejos sustentables, para utilizarlas posteriormente en productos MLE en un periodo de tiempo mucho menor.
- Finalmente, en la industria local se posee la maquinaria necesaria para la fabricación de estos productos a escalas menores. Lo que se busca es un mayor interés por parte de la sociedad para el uso y la implementación de elementos MLE de gran envergadura y diferentes formas. Sus acabados lo destacan por sobre otros materiales y su relación costo/resistencia lo catalogan como una gran alternativa en la construcción.

BIBLIOGRAFÍA

- Arriaga, F., Herrero, E., & Íñiguez, G. (2010). Productos de madera para la construcción, Documento de aplicación del CTE, Construir con Madera (CcM). CONFEMADERA.
- Batista, A., Rodrigo, M., Calil Jr., C., & Martínez, M. (2002). Evaluación de la resistencia a la tracción en elementos estructurales de madera con uniones dentadas. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 4(2), 168-178.
- Carangui, S., & Lasso, V. (2010). *Estudio de los sistemas constructivos tradicionales en madera*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Contreras, W., Valero, S. W., Thomson, E., Owen de C, M. E., & Barrios, E. (2007). Determinación de los esfuerzos de diseño de vigas laminadas de Pino Caribe (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*) encoladas con adhesivo de isocianato (MDI). *Maderas. Ciencia y tecnología*, 9(3), 285-298.
- Dávalos, E. T. (2012). *Estudio de la madera sujeta a compresión*. (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- De Cristóforo, N. (2014). *Madera Laminada*. Apuntes del curso de Industrias de transformación mecánica. La Plata, Argentina. Obtenido de https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/19457/mod_resource/content/2/MADERA%20LAMINADA.pdf
- Demkoff, M. (2003). *Vigas laminadas estructurales de madera, su fabricación y empleo*. Concordia. Obtenido de <https://m1db.files.wordpress.com/2012/05/madera-laminada-demkoff.pdf>
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. (1999). *Timber structures. Glued laminated timber. Strength classes and determination of characteristic values (DIN EN 1194:1999). English version*.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. (2004). *Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties (DIN EN 408:2004). English version*.
- Enríquez, D. E. (2014). *Reforzamiento estructural para forjados de madera en edificaciones patrimoniales y contemporáneas*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Escobar, O., Rodríguez, J. R., & Correa, J. A. (2015). *Conceptos básicos sobre las resistencias de las maderas*. Antioquia, Colombia.

- Espinosa, A. J., & Salazar, A. F. (2011). *Propiedades físico-mecánicas de uniones clavadas y empernadas, sometidas a compresión, con madera tipo A, tipo B y tipo C: Guayacán, Eucalipto y Fernán Sánchez; para el diseño estructural de la cubierta del proyecto casa Mointufar 623 (Fonsal)*. (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.
- González, H. Á., Hellwig, S., & Montoya, J. A. (2008). Resultados del ensayo del módulo de young y resistencia a la flexión de vigas laminadas de *Guadua angustifolia Kunth*. *Scientia et Technica*, 40, 291-296.
- Guerra, A. F. (2017). *Comportamiento a flexión de vigas de madera reutilizada unida con Bambú (Guadua angustifolia kunth) para uso estructural*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Hansen, H. (1970). *Diseño moderno de estructuras de madera*.
- Herrero, M. E. (2013). *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (1988). *Maderas - Parte 1: Especies latifoliadas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad (NCh 1970/1.Of88)*.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (1991). *Madera laminada encolada - Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de Pino radiata (Nch 2150.Of89)*.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2003). *Calibración y uso de xilohigrómetros portátiles (NCh 2827.Of2003)*.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2013). *Madera laminada encolada estructural - Requisitos, métodos de muestreo e inspección (NCh 2148)*.
- Jacob, J., & Garzón, O. L. (s.f.). *Flexural strengthening of glued laminated timber beams with steel and carbon fiber reinforced polymers*. (Master's Thesis). Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Keenan, F. J., & Tejada, M. (1987). *Maderas tropicales como material de Construcción en los países del Grupo Andino de América del Sur*. Ottawa.
- Louw, F. (1964). *Finger-jointing techniques and applications*. Timber Research Unit, CSRI, Pretoria, N° RU 1.34.
- MAE (Ministerio del Ambiente del Ecuador), & FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). (2014). *Propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de 93 especies forestales*. Quito, Ecuador.

- Nadir, Y., & Nagarajan, P. (2014). The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber wood. *Construction and Building Materials*, 55, 398-405.
- NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN. (2015). *Estructuras de madera (NEC-SE-MD)*.
- PADT-REFORT/JUNAC. (1984). *Manual de diseño para maderas del Grupo Andino*. Lima, Perú.
- Parker, H. (1972). *Diseño simplificado de estructuras de madera*. Mexico: Limusa-Wiley.
- Puy, M. (2015). *Aplicación de la teoría Zig-Zag refinada para el análisis de vigas laminadas de madera*. (Tesis de maestría). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Recalde, F. R. (2015). *Diseño de elementos estructurales utilizando madera laminada*. (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Ribeiro, A., de Jesus, A., Lima, A., & Lousada, J. (2009). Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of maritime. *Construction and Building Materials*, 23, 2738-2745.
- Rodas, D. S., & Urgiles, M. P. (2015). *Diseño de un centro turístico, con tecnología de madera laminada y gaviones de piedra*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Sanango, P. T. (2017). *Comparación del diseño y evaluación de miembros estructurales de madera laminada encolada con uniones dentadas, de Pino Radiata y Eucalyptus Globulus*. (Tesis de pregrado). Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.
- Somoza, L. (1986). La madera laminada encolada: historia y definición. *Boletín académico*, 5, 41-45.
- Tran, V., Oudjene, M., & Méausoone, P. (2016). Experimental investigation on full-scale glued oak solid timber beams for structural bearing capacity. *Construction and Building Materials*, 123, 365-371.

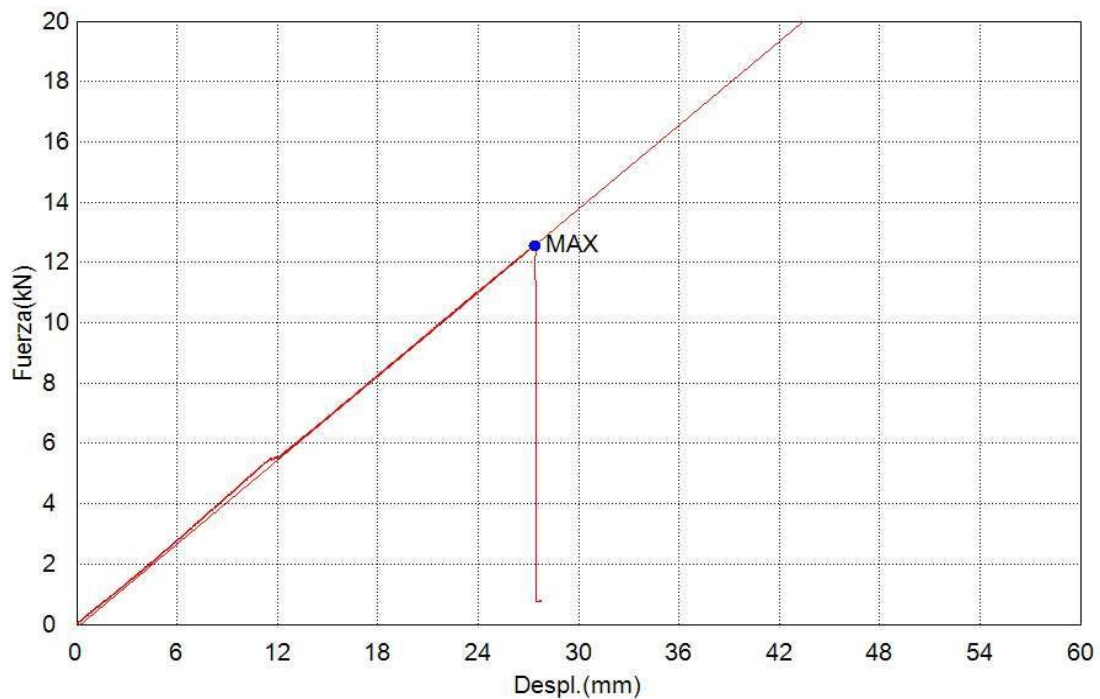
ANEXOS

ANEXO 1: Gráficas y valores obtenidos de MOE y MOR a través de la prensa SHIMADZU. (Vigas con listones continuos)

Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA PINO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES CONTINUOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	13/2/2020	Fecha de ensayo	13/2/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
N° de partidas:	1	Muestra #:	1

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 6 – 12 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	12306,98	12,5586	46,44	27,3833

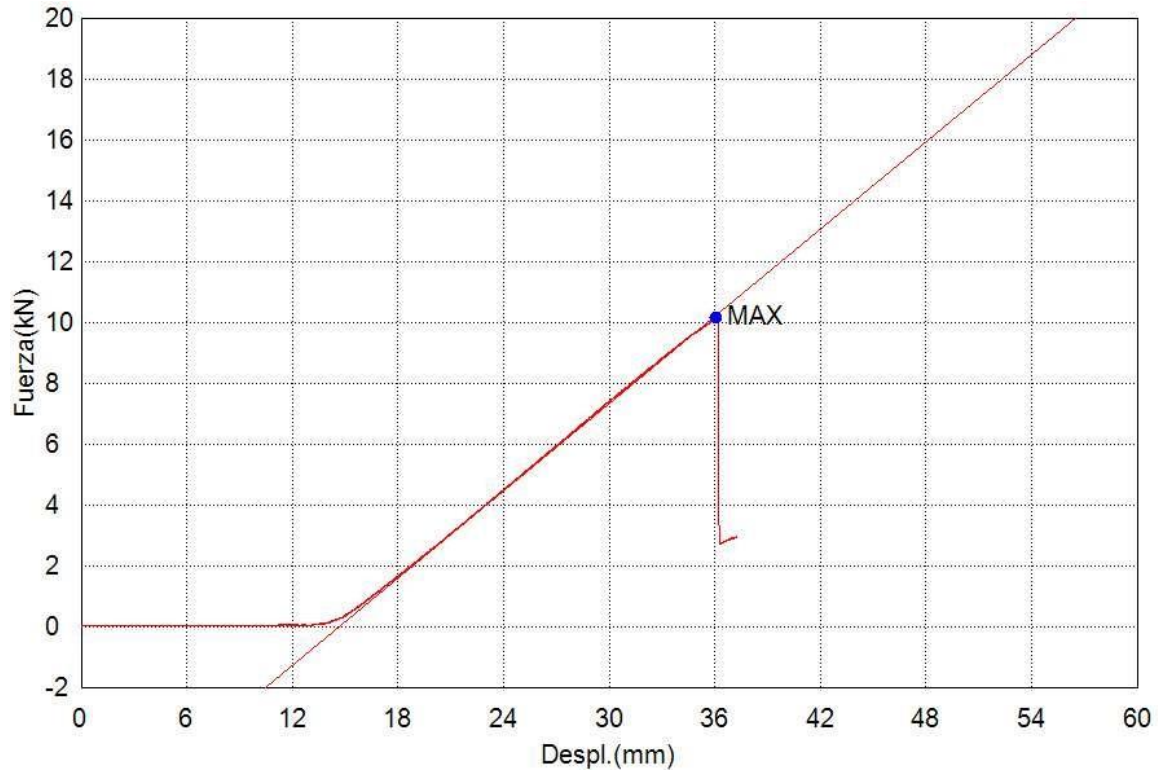
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,44765	137,680



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA PINO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES CONTINUOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	13/2/2020	Fecha de ensayo	13/2/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
N° de partidas:	1	Muestra #:	2

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 2 - 10 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	12930,75	10,1398	37,81	22,5990

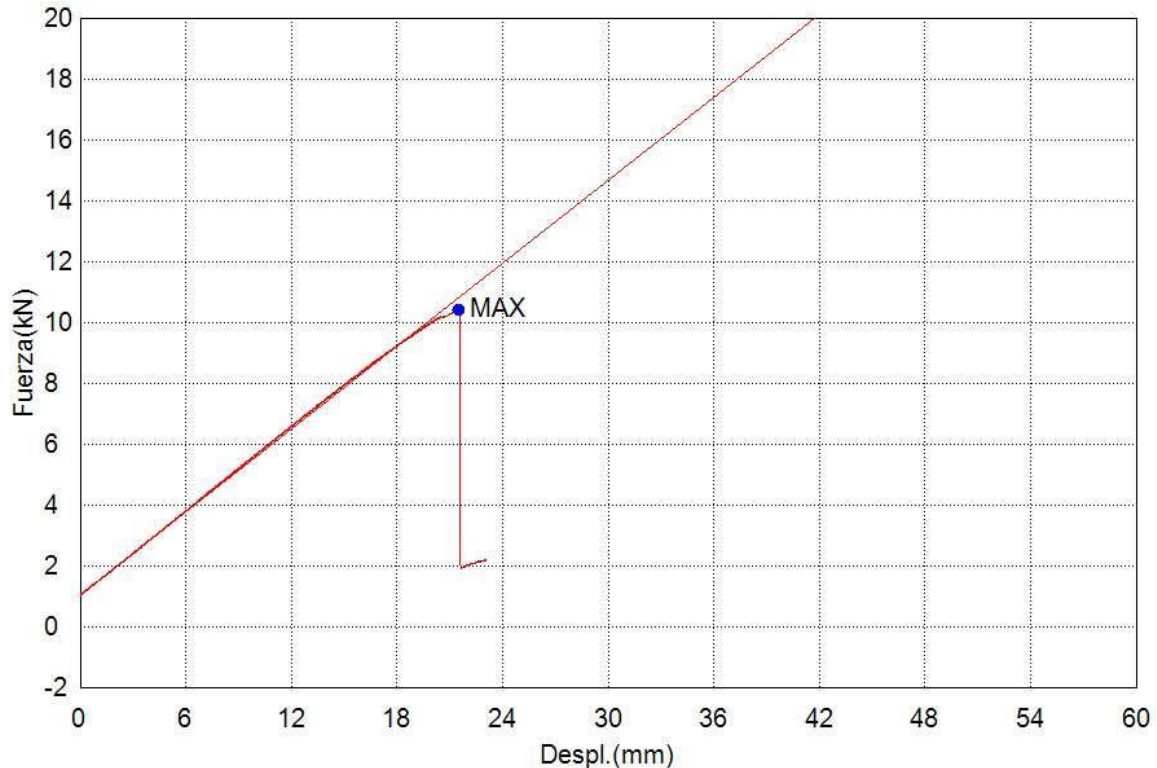
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,59013	181,250



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA PINO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES CONTINUOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	13/2/2020	Fecha de ensayo	13/2/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
N° de partidas:	1	Muestra #:	3

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 2 - 10 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	11896,83	10,3966	37,85	21,4883

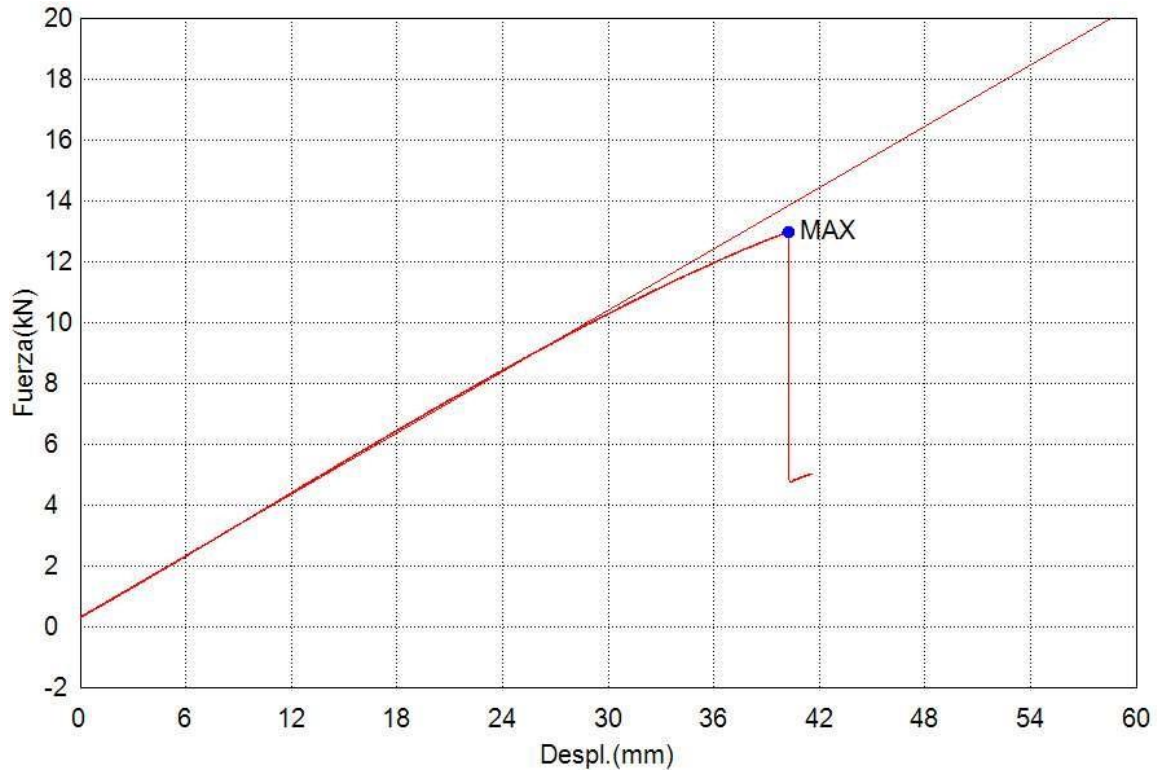
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,35128	108,190



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA CANELO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES CONTINUOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	13/2/2020	Fecha de ensayo	13/2/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
N° de partidas:	1	Muestra #:	1

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 2 - 10 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	13028,31	12,9687	59,40	40,2316

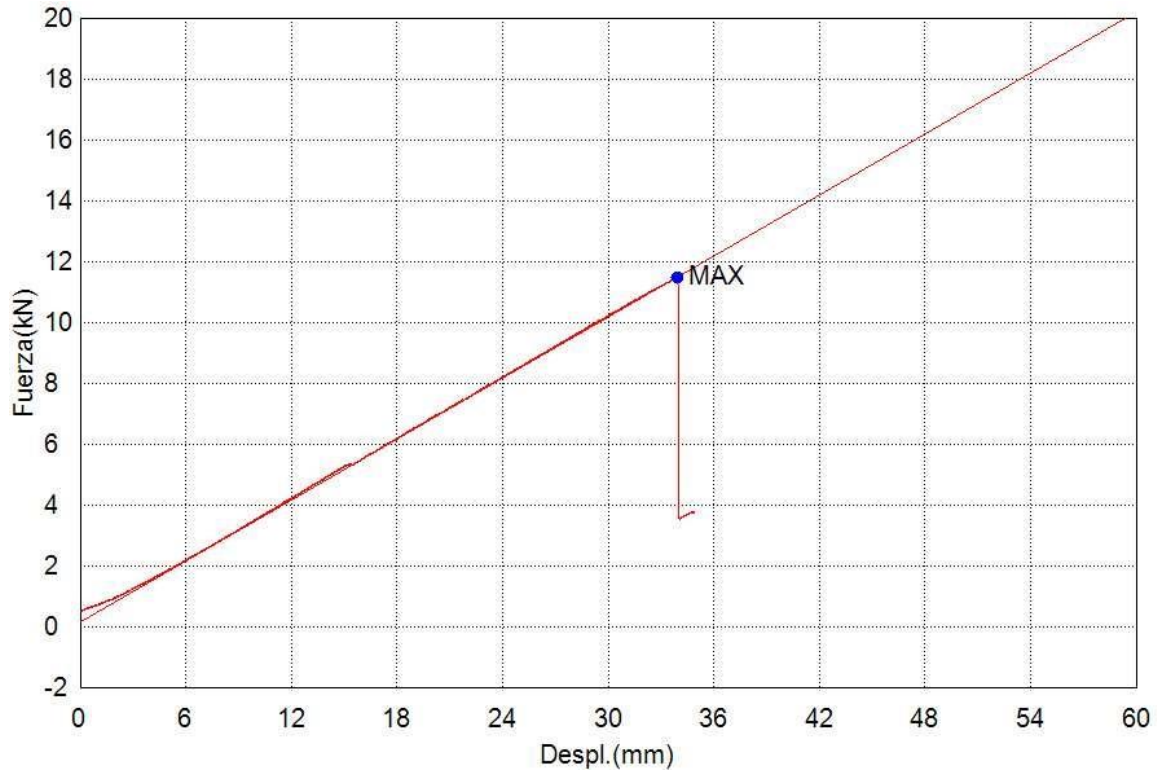
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,65768	201,900



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA CANELO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES CONTINUOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	13/2/2020	Fecha de ensayo	13/2/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
N° de partidas:	1	Muestra #:	2

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 2 - 10 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	12826,59	11,4708	52,39	33,9481

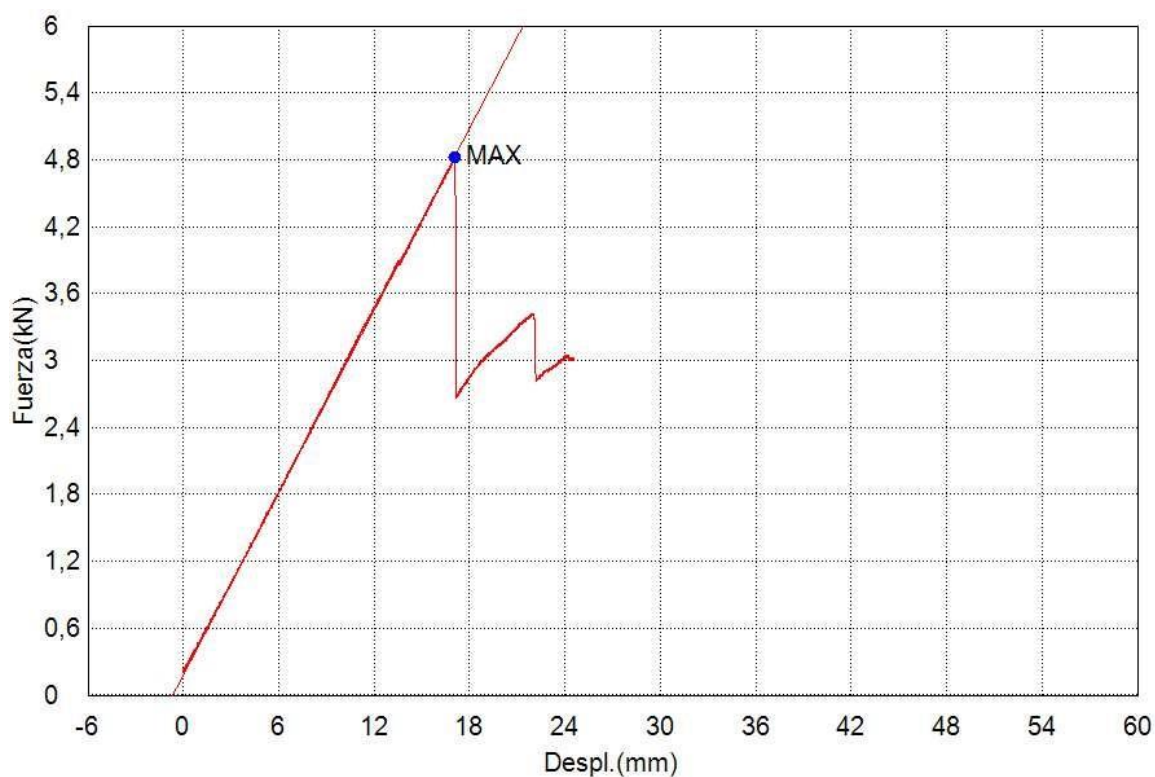
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,55496	170,480



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA CANELO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES CONTINUOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	13/2/2020	Fecha de ensayo	13/2/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	3

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 2 – 4 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	9615,44	4,82210	21,55	17,0860

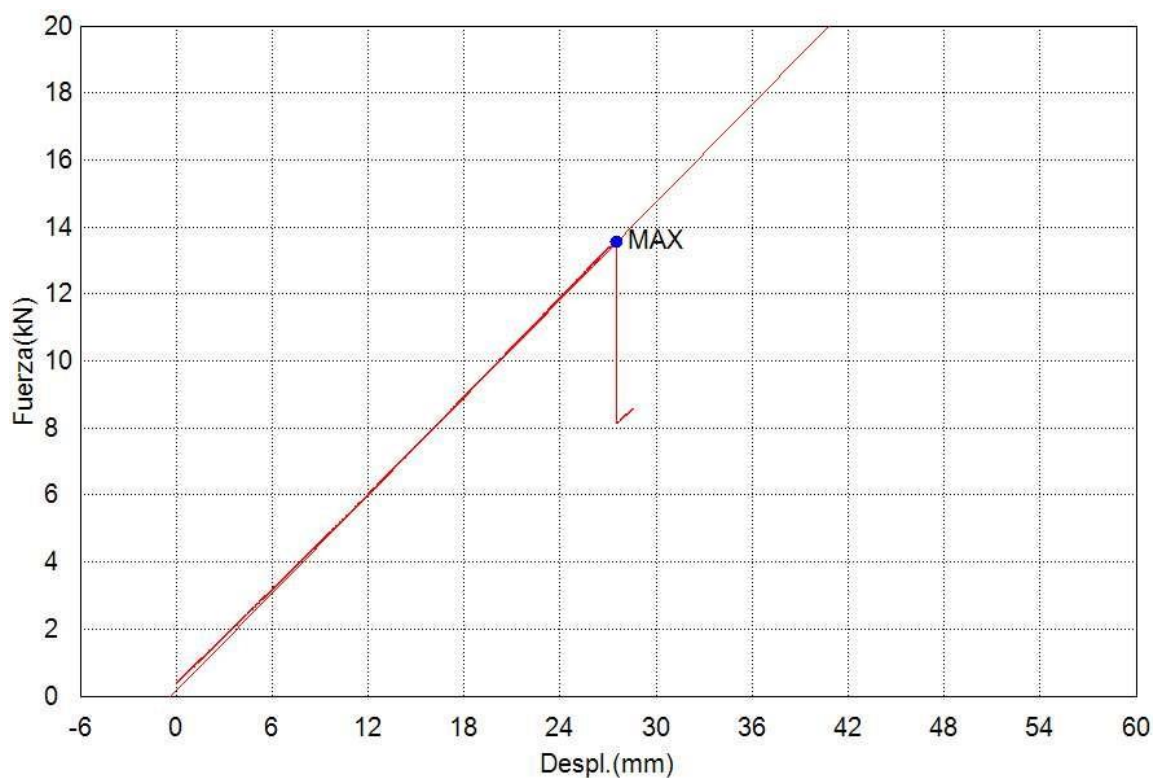
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,27931	86,1700



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA FERNÁN SÁNCHEZ
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES CONTINUOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	13/2/2020	Fecha de ensayo	13/2/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	1

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 4 – 12 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	14189,60	13,5657	53,13	27,5050

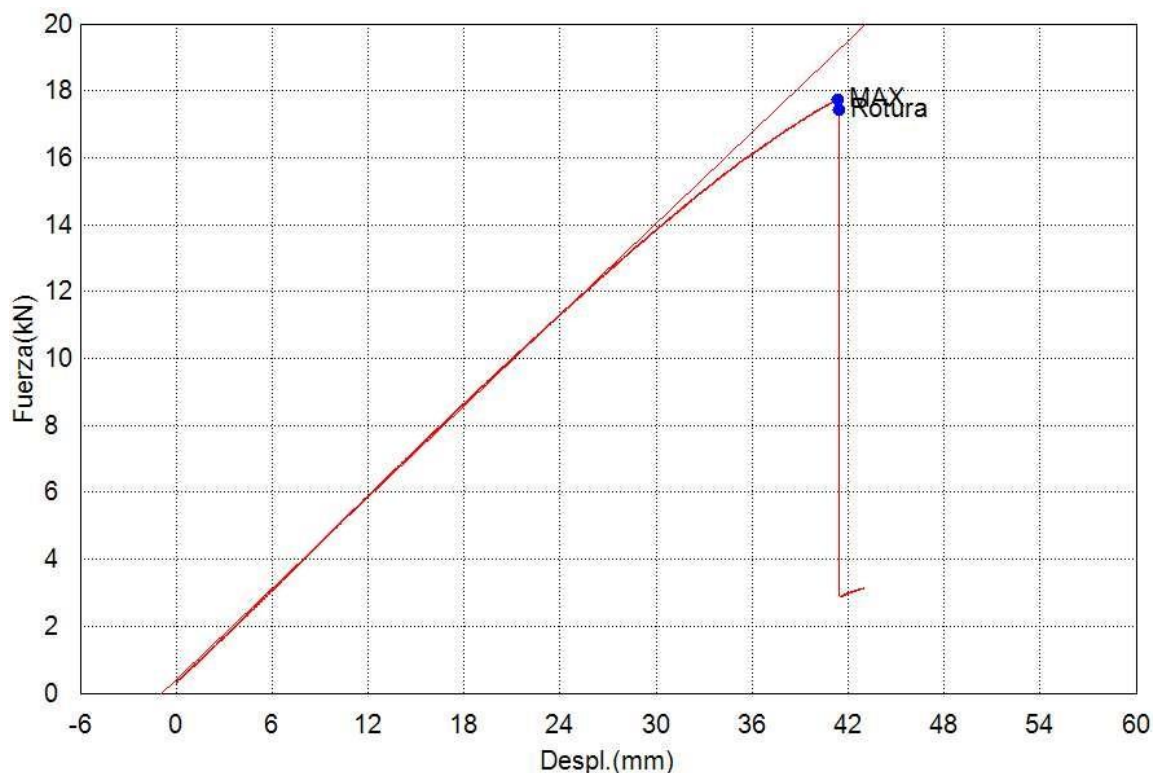
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,44964	138,190



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA FERNÁN SÁNCHEZ
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES CONTINUOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	13/2/2020	Fecha de ensayo	13/2/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	2

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 4 – 12 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	13535,38	17,7514	70,65	41,3293

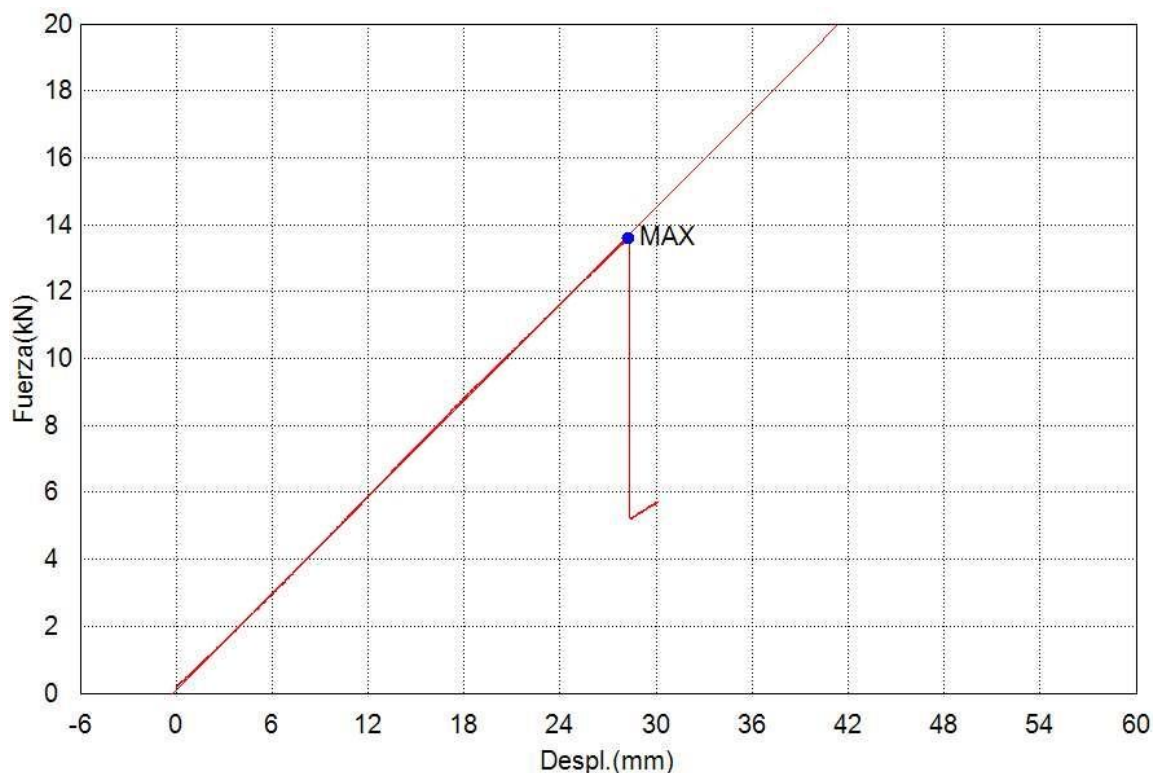
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,67563	207,380



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA FERNÁN SÁNCHEZ
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES CONTINUOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	13/2/2020	Fecha de ensayo	13/2/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	3

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 4 – 12 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	14276,25	13,5988	53,79	28,2833

Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,46236	142,140

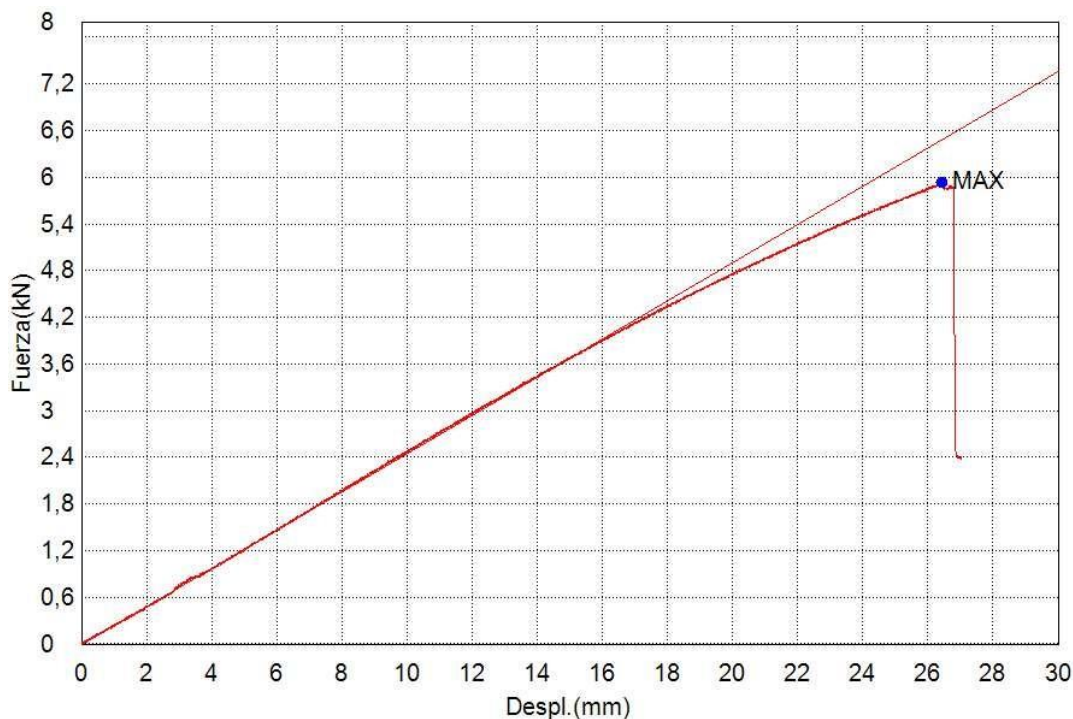


ANEXO 2: Gráficas y valores obtenidos de MOE y MOR a través de la prensa SHIMADZU. (Vigas con listones empalmados)

Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA PINO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES EMPALMADOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	6/3/2020	Fecha de ensayo	6/3/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 pts.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	1

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 1 – 4 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	8259,83	5,92709	25,44	26,4295

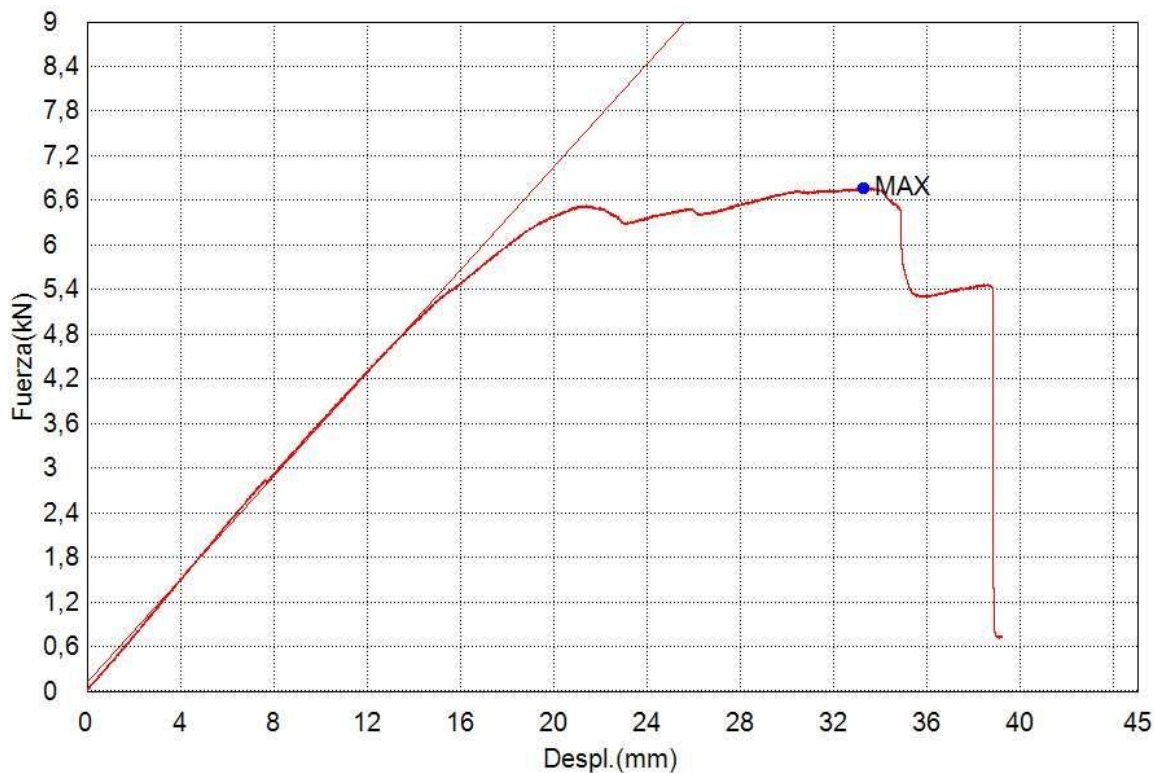
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,43205	132,890



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA PINO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES EMPALMADOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	6/3/2020	Fecha de ensayo	6/3/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	2

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 1 – 5 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	10106,37	6,77045	26,54	33,2851

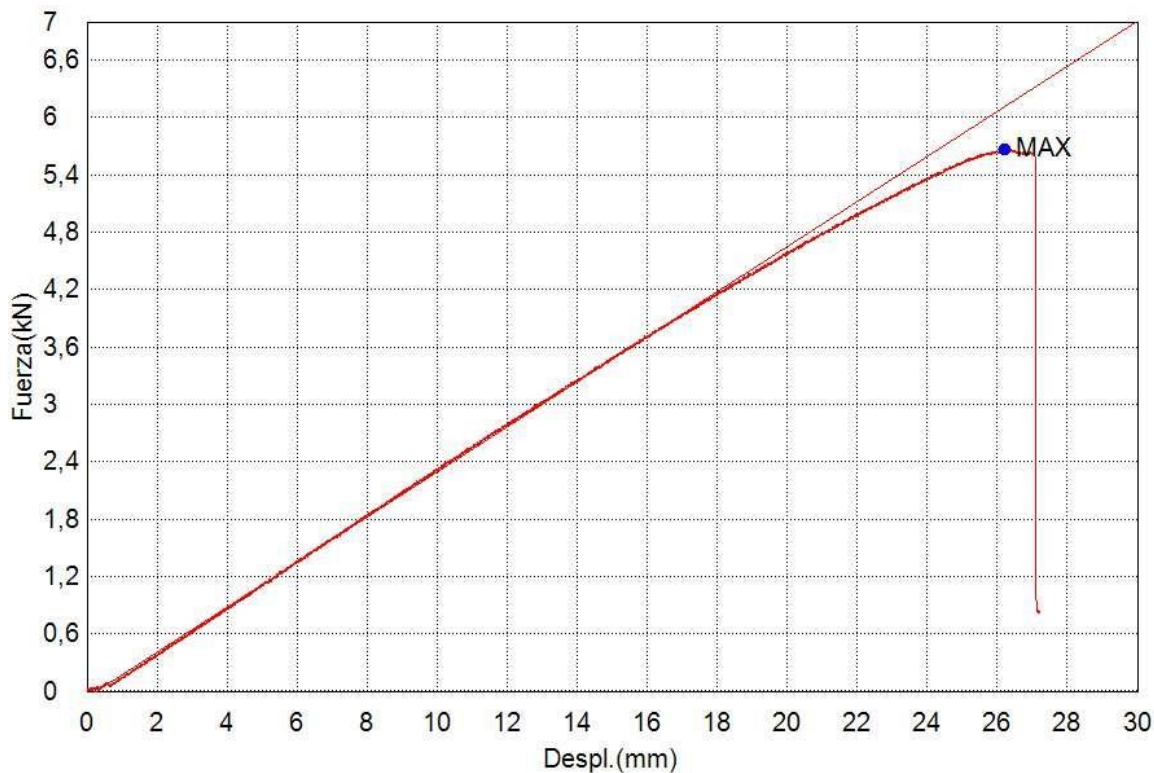
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,54413	167,160



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA PINO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES EMPALMADOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	6/3/2020	Fecha de ensayo	6/3/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	3

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 1 - 4 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	8025,73	5,66673	24,59	26,2184

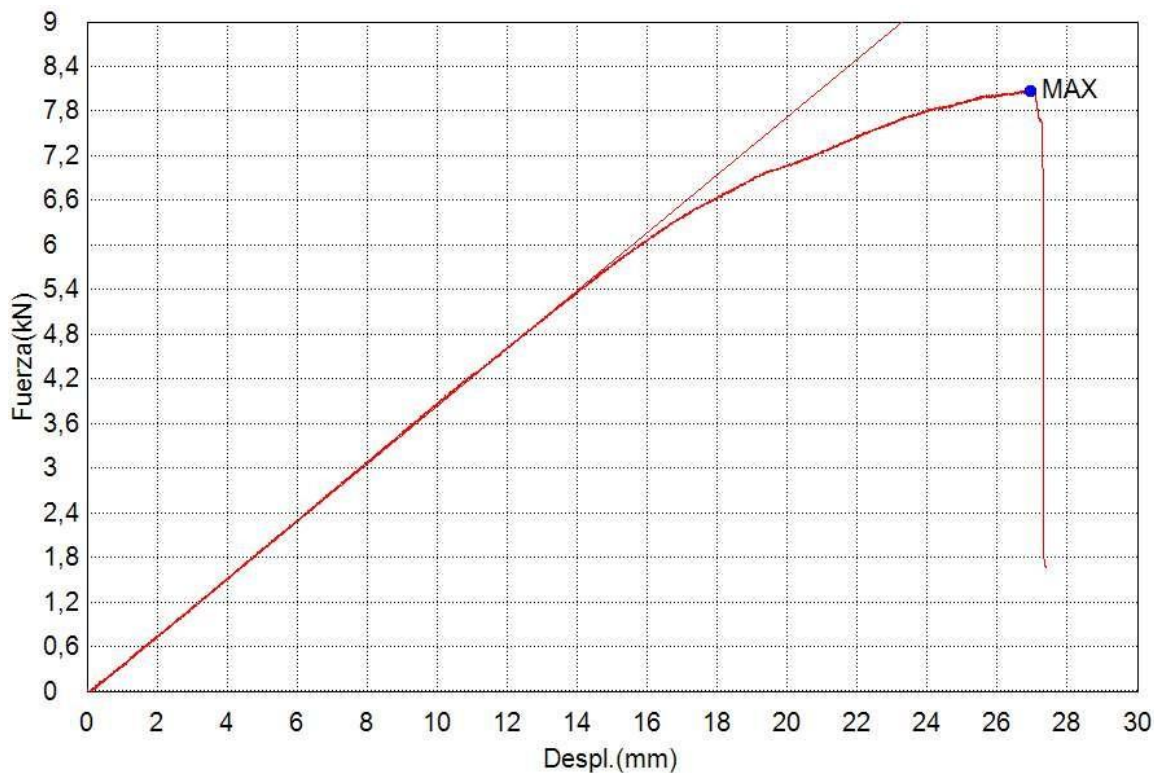
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,42860	131,830



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA CANELO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES EMPALMADOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	6/3/2020	Fecha de ensayo	6/3/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	1

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 1 – 5 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	12570,71	8,07126	33,84	26,9515

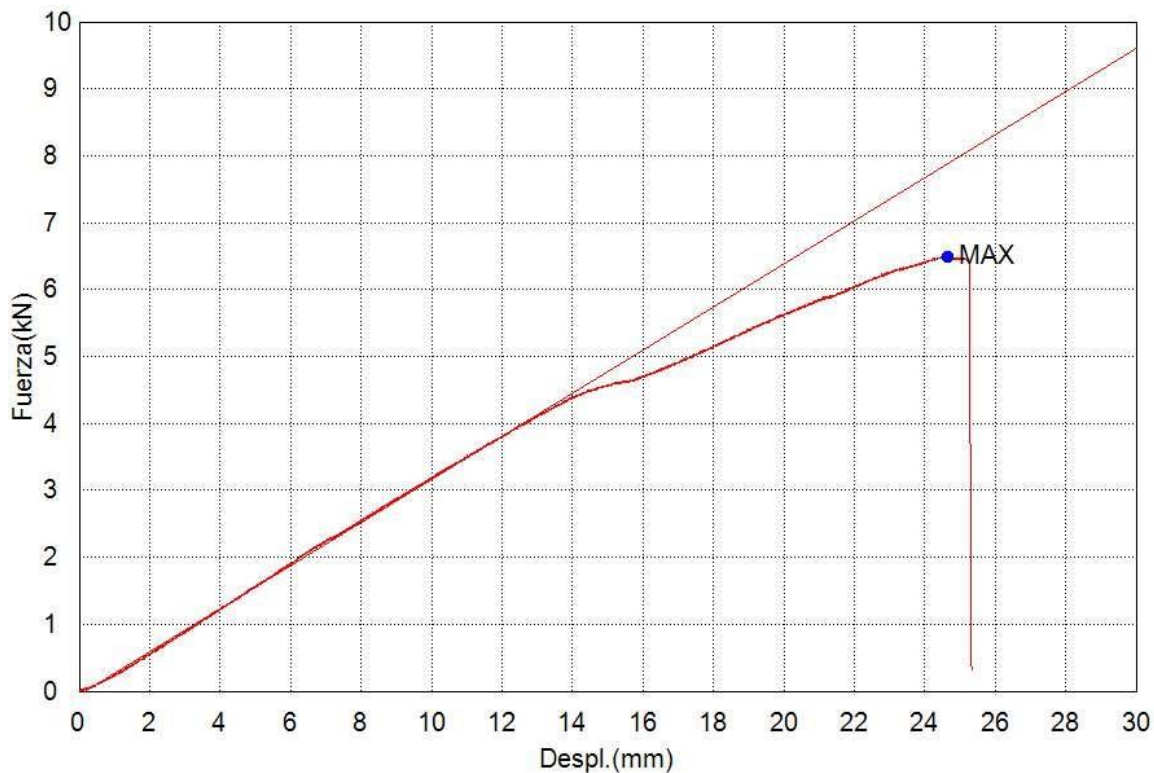
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,44059	135,510



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA CANELO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES EMPALMADOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	7/5/2020	Fecha de ensayo	7/5/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	2

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 1 - 4 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	11558,99	6,48626	29,12	24,6468

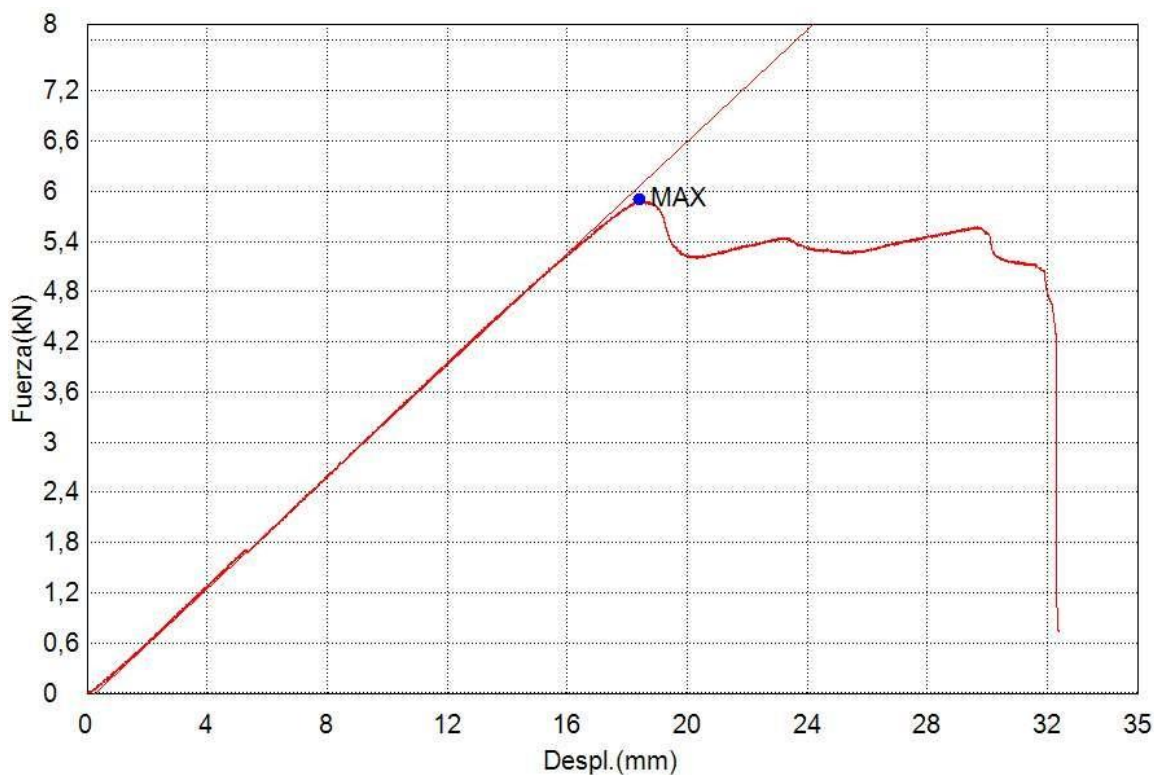
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,40291	124,000



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA CANELO
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES EMPALMADOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	7/5/2020	Fecha de ensayo	7/5/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	3

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 1 – 5 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	12630,80	5,90197	27,36	18,4133

Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,30101	92,8100



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA FERNÁN SÁNCHEZ
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES EMPALMADOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	7/5/2020	Fecha de ensayo	7/5/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	1

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 1 – 6 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	13843,39	6,80288	29,49	17,1343

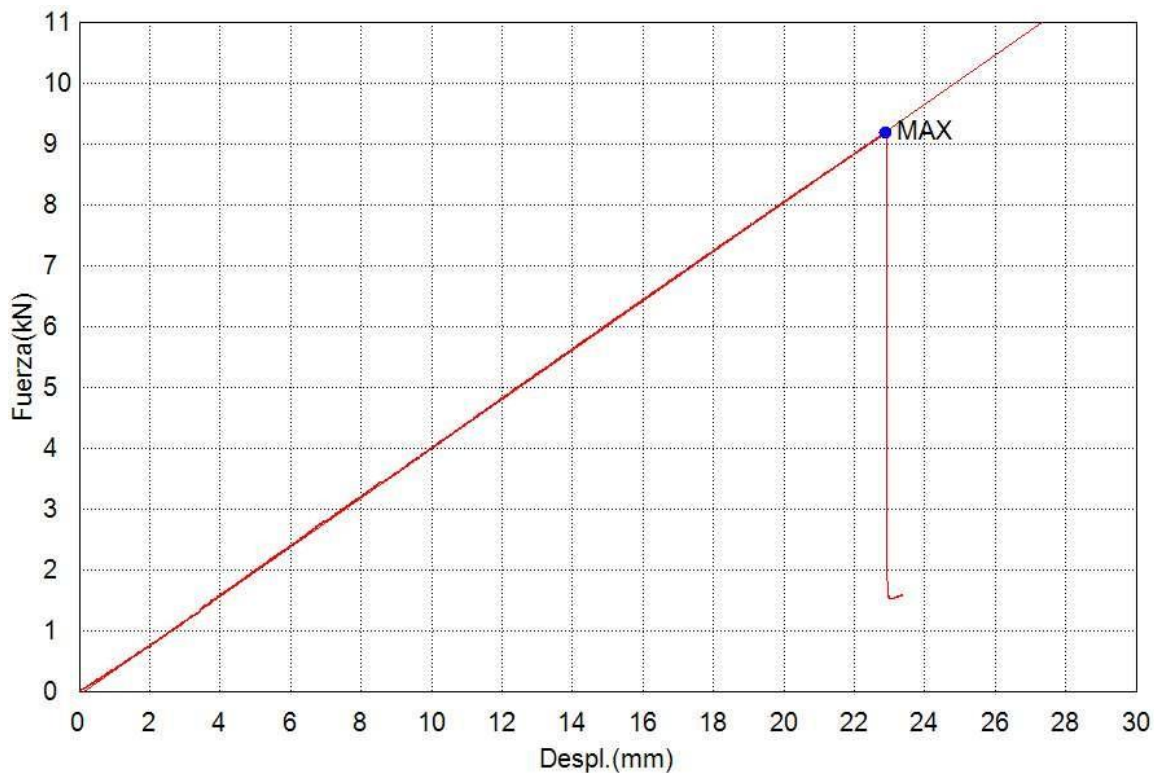
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,28010	86,4000



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA FERNÁN SÁNCHEZ
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES EMPALMADOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	7/5/2020	Fecha de ensayo	7/5/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	2

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 1 – 8 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	13401,28	9,18166	38,97	22,8714

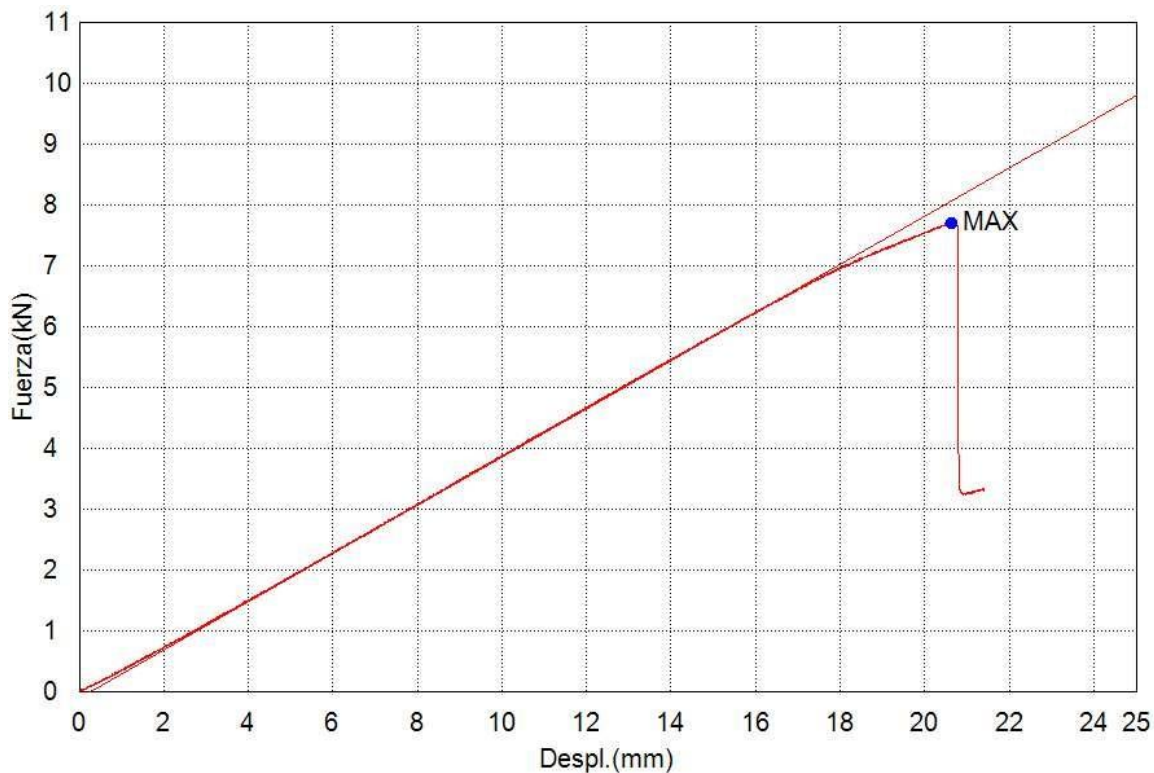
Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,37389	115,090



Palabra llave	VIGAS MLE	Nombre de producto	VIGA FERNÁN SÁNCHEZ
Nombre de archivo de ensayo	VIGAS MLE LISTONES EMPALMADOS	Nombre de método de ensayo	ENSAYO A FLEXIÓN
Fecha de informe	7/5/2020	Fecha de ensayo	7/5/2020
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 4 ptos.
Velocidad	12mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Muestra #:	3

Nombre	M. Elástico (MOE)	Max. Fuerza	Max. Tensión (MOR)	Max. _Desplazamiento
Parámetros	Fuerza 1 – 6 kN	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	kN	MPa	mm
Valor	13061,52	7,69997	32,61	20,6260

Nombre	Max. Deformación	Max. Tiempo
Parámetros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	seg
Valor	0,33718	103,860



ANEXO 3: Registros fotográficos

- Vigas UPN e IPN usadas para un mejor acoplamiento en la prensa del Laboratorio



- Adhesivo MUF-1242 y catalizador Hardener-2542 distribuidos por la empresa AkzoNobel





- Vigas MLE con láminas continuas



- **Ensayos a flexión en vigas con láminas continuas**



- **Ensayos a flexión en vigas con láminas empalmadas**



- **Mecanismos de falla**





- **Delaminación temprana, por mal encolado**

