

Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Secretaría de Investigación y Postgrado. Maestrías en Madera, Celulosa y Papel

Maestranda
Jorge Oscar Sánchez

Mejora de las características mecánicas de Vigas de Madera Laminada Reforzadas con Material Sintético

Tesis de Maestría presentada para obtener el título de “Magíster en Ciencias de la Madera, Celulosa y Papel”
OTM

Director
MSc. Ing. Obdulio Pereyra

Co-Director
MSc. Ing. Constantino Zaderenko

Posadas, 2015



Esta obra está licenciada bajo Licencia Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES

**MEJORA DE LAS CARACTERISTICAS
MECANICAS DE VIGAS DE MADERA LAMINADA
REFORZADAS CON MATERIAL SINTÉTICO**

JORGE OSCAR SANCHEZ

**Tesis presentada a la Universidad Nacional de
Misiones como exigencia parcial de la maestría
en Tecnología de la Madera Celulosa y Papel.**

**DIRECTOR : MSc. Ing. Obdulio Pereyra
CODIRECTOR: MSc. Ing. Constantino Zaderenko**

2015

**A Dios creador de
todo lo que existe.
A mi esposa Delia
y mis hijos
Guillermo y Alejandra.**

AGRADECIMIENTOS

Sin duda comenzar un postgrado y culminarlo con un trabajo de investigación es un desafío que para llevarlo adelante fue de inestimable valor la ayuda y apoyo de aquellos profesionales que de una u otra manera han puesto de su tiempo, conocimientos y experiencia para que pueda concretarlo. Para todos ellos va mi agradecimiento.

A mis directores de Tesis MSc. Ing. Obdulio Pereyra y MSc. Ing. Constantino Zaderenko que me desafiaron a comenzar el postgrado y por su permanente apoyo y orientación durante la elaboración del trabajo.

A las empresas WALTÍ HNOS y particularmente a Daniel Walti por autorizar la utilización de materiales, equipos y el personal para la fabricación de las vigas laminadas lo que hizo posible la realización de todos los ensayos.

A los docentes de la Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales que me ayudaron en las distintas etapas de la ejecución de los Módulos. Y particularmente a la Dra. María Cristina Area por su aporte y sugerencias durante la ejecución de este trabajo final.

A la profesora MSc. Ing. Teresa Suirezs, jefa del laboratorio de tecnología, por su colaboración en el tratamiento de datos de los ensayos y autorizar la utilización de los equipos del laboratorio de Tecnología de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales.

A Adelaida Bragañolo y Paola Acevedo, asistentes del Laboratorio, por colaborar en las etapas de los ensayos.

A los compañeros de la maestría con quienes pudimos intercambiar ideas, trabajos y experiencias que fueron útiles para el estudio y además permitieron crear un compañerismo que va a perdurar en el tiempo.

Para todos mi más sincera gratitud.

RESUMEN

En este trabajo se ha propuesto como objetivo reforzar las vigas laminadas de madera fabricadas a partir de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*, para incrementar el módulo de rotura a la flexión estática y el módulo de elasticidad a la flexión estática, incorporando cordones trenzados, de baja elongación y alta resistencia a la tracción, fabricados con fibras de polietileno con 3% de elongación al 100% de la carga de rotura. Los cordones se ubicaron en sentido longitudinal y entre las láminas que soportan los máximos esfuerzos de tracción. No se modificó el proceso productivo, las especies de madera, ni los adhesivos, ni los procedimientos de armado; solamente se incorporaron los cordones y se verificaron los resultados por medio de ensayos mecánicos. El cordón seleccionado tiene 4 mm de diámetro y 1060 kg de resistencia a la rotura. Se realizaron ensayos previos de tracción, para verificar su compatibilidad con los adhesivos utilizados y su adherencia a la madera, para lo cual se tomaron dos láminas de 15 mm de espesor, 50 mm de ancho y 200 mm de longitud, en una se hizo una ranura longitudinal para alojar el cordón, se aplicó el adhesivo, se instaló el cordón y se prensó el conjunto. Los ensayos consistieron en sujetar las láminas de madera, traccionando el cordón hasta que comenzaba a deslizar entre ambas láminas. El valor promedio fue de 13,7 N/mm. Se observó la necesidad de aplicar una pretensión a los cordones durante el armado de las vigas, para minimizar el efecto del trenzado y lograr alinear las fibras en el sentido del esfuerzo. Las medidas de las vigas fueron de: 55 mm de ancho, 100 mm de altura y 2000 mm de longitud. Se armaron un total de 30 vigas: seis vigas testigos sin cordones, seis vigas con un cordón y seis vigas con dos cordones a las que se le aplicó, como valor tentativo, una precarga de 20 kg en los extremos de cada cordón, luego seis vigas con un cordón y seis vigas con dos cordones a las que se le aplicó, como segundo valor tentativo con la finalidad de estudiar la tendencia, una precarga de 40 kg. En el caso de dos cordones se distanciaron con un valor tentativo de 25 mm entre ejes. Los ensayos de flexión estática se realizaron de acuerdo a lo especificado en las normas vigentes para vigas laminadas, en una Máquina Electromecánica Universal, Modelo 10407030 fabricante DIDACTA, con una

capacidad de 300 kN. Los resultados fueron procesados estadísticamente comparándolos entre las vigas testigo y las vigas con los cordones: módulo de rotura a la flexión estática, módulo de elasticidad a la flexión estática y la carga de rotura a la flexión estática. Estos dieron un incremento estadísticamente significativo, resultando valores de 27,50%, 42,02%, 27,50%, respectivamente y permitieron establecer que la incorporación de cordones sintéticos produce una mejora de las características mecánicas. Las vigas laminadas de madera tienen un uso destacado como elementos estructurales y los cordones de refuerzo permiten obtener una mejora del -21,57% en la relación peso/resistencia.

CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
CONTENIDOS.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE FOTOS.....	xii
LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	xiii
1. INTRODUCCION.....	1
1.1 Hipótesis	3
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Variables.....	4
2. REVISION BIBLIOGRAFICA.....	5
2.1 Vigas laminadas.....	5
2.2 <i>Pinus taeda, Pinus elliottii</i>	11
2.3 Criterios de dimensionamiento.....	11
2.4 Flexión estática.....	12
2.5 Módulo de elasticidad a la flexión estática MOE....	19
2.6 Módulo de rotura a la flexión estática MOR.....	22
2.7 Valores característicos de la madera laminada encolada estructural.....	23
2.8 Adhesivos.....	23
2.9 Fibras de Polietileno – Dyneema.....	25
3. MATERIALES Y METODOS.....	27

3.1 Materiales a utilizar.....	27
3.2 Determinación del tipo de muestras.....	28
3.2.1 Verificación del cordón.....	28
3.2.2 Preparación de muestras.....	30
3.3 Ensayos de las propiedades mecánicas.....	35
3.3.1 Flexión estática.....	35
3.3.2 Módulo de elasticidad a la flexión estática MOE.....	38
3.3.3 Módulo de rotura a la flexión estática MOR..	39
3.4 Equipos de laboratorio.....	39
3.4.1 Flexión estática y tracción de cordones.....	39
3.5 Diseño experimental.....	40
3.5.1 Estudio del comportamiento del cordón.....	40
3.5.2 Estudio comparativo de las vigas.....	41
3.5.3 Diseño Factorial a dos niveles.....	41
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1 Prueba de adherencia de los cordones.....	43
4.2 Módulo de rotura a flexión estática.....	44
4.3 Módulo de elasticidad a la flexión estática.....	46
4.4 Carga de rotura.....	49
4.5 Resumen comparativo de las propiedades mecánicas.....	52
4.6 Comparación de los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas con la Norma IRAM y la Norma Europea.....	53
5. CONCLUSIONES.....	55
5.1 Conclusiones parciales.....	55
5.1.1 Comportamiento del cordón.....	55

5.1.2 Estudio comparativo de las vigas.....	55
5.1.3 Diseño factorial a dos niveles.....	56
5.2 Conclusión general.....	56
5.3 Profundización del trabajo.....	56
5.4 Recomendaciones.....	57
6. BIBLIOGRAFIA.....	59
7. ANEXO 1.....	63
8. ANEXO 2.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Valores característicos para vigas laminadas de madera - Pinus taeda/elliottii.....	23
Tabla 2: valores de P y f leídos en los comparadores para la Viga testigo V2 correspondiente al tratamiento VT.....	38
Tabla 3: Carga de rotura de la unión cordón-madera por pérdida de adherencia, cordón-lámina, en probetas de 200 mm de longitud.....	40
Tabla 4: Experiencias a realizar.....	41
Tabla 5: Experiencias realizadas en el Diseño Factorial a dos niveles.....	42
Tabla 6: Resumen estadístico de la Fuerza Especifica de adherencia.....	43
Tabla 7: Resumen estadístico MOR.....	45
Tabla 8: Resumen estadístico del MOE.....	48
Tabla 9: Resumen estadístico $P_{m\acute{a}x}$.....	50
Tabla 10: Comparación del MOR, MOE y $P_{m\acute{a}x}$.....	52
Tabla 11: Comparación % de MOR, MOE, P_{max} y mejora de la relación Peso/Resistencia en relación al tratamiento VT...	52
Tabla 12: Comparación del MOR, MOE y Densidad.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Dependencia de algunas propiedades de la madera en función del contenido de humedad.....	6
Figura 2: Efecto del nudo de borde, A: nudo en el borde de una viga; B: pérdida de la sección transversal (área sombreada).....	7
Figura 3: Curva de resistencia a la flexión % en función de la relación k/h.....	7
Figura 4: Sección transversal de una viga y diagrama de tensiones durante la flexión.....	12
Figura 5: Diagramas de Momentos Flectores, de Esfuerzos de Corte y flecha de descenso.....	13
Figura 6: Distribución de tensiones de las fibras extremas con respecto a los momentos flectores.....	14
Figura 7: Principales direcciones de la madera.....	15
Figura 8: Ensayo típico de resistencia a la tracción y compresión paralela a las fibras de la madera.....	16
Figura 9: Fases características de tensiones y deformaciones del ensayo de flexión. σ_c y σ_t = tensiones de compresión y tracción respectivamente; ϵ_c y ϵ_t = deformaciones por compresión y tracción respectivamente; M1; M2; M3 = momentos flectores; e = desplazamiento del eje neutro; h = altura de la sección.....	17
Figura 10: Grafico de carga – deformación dentro de los márgenes de deformación elástica.....	21
Figura 11: Esquema básico de unión mediante adhesivo.....	23
Figura 12: Diferenciación entre adhesión y cohesión.....	24
Figura 13: Esquema de la sección de vigas y diagrama de tensiones durante la flexión.....	31

Figura 14: Viga sin cordón.....	31
Figura 15: Esquema “a” de la sección de vigas, “b” lámina con los cordones incorporados.....	32
Figura 16: Viga con un cordón.....	33
Figura 17: Viga con dos cordones.....	33
Figura 18: Esquema del ensayo de flexión estática para determinación de MOR y MOE.....	36
Figura 19: Diagrama tensión deformación obtenido de un ensayo de flexión estática.....	37
Figura 20: Media de la fuerza de adherencia específica.....	43
Figura 21: Comparación de medias del módulo de rotura a la flexión estática.....	45
Figura 22: Efecto de las variables el MOR a la flexión estática.....	46
Figura 23: Recta típica de regresión para la determinación de los valores P_1, P_2, w_1 y w_2 con un coeficiente de correlación de 0,99991 siendo $R^2 = 99,9823$ %.....	47
Figura 24: Comparación de medias de Modulo de elasticidad a la flexión.....	48
Figura 25: Efecto de las variables sobre el MOE a la flexión estática.....	49
Figura 26: Comparación de medias de la carga de rotura en la flexión.....	50
Figura 27: Efecto de las variables sobre $P_{m\acute{a}x.}$ a la flexión estática.....	51

LISTA DE FOTOS

Foto 1: Estructuras construidas con vigas laminadas de madera.....	3
Foto 2: Vigas macizas de madera donde se observan los nudos.....	7
Foto 3: Vigas laminadas de madera.....	8
Foto 4: <i>Finger – joint</i> para el armado de láminas.....	9
Foto 5: Estructuras construidas con vigas laminadas de madera.....	10
Foto 6: Vigas Laminadas de <i>Pinus taeda/elliottii</i>.....	27
Foto 7: Tipo de cordón empleado.....	28
Foto 8: Ranuras realizadas en una lámina para alojar un cordón y en otra lamina para alojar dos cordones.....	28
Foto 9: Probetas para ensayos exploratorios.....	29
Foto 10: Ensayo de tracción que determina la carga de adherencia del cordón a la madera.....	30
Foto 11: Ranuras de alojamiento de los cordones.....	32
Foto 12: Prensa para el armado de las vigas.....	34
Foto 13: Sección transversal de vigas con un cordón y con dos cordones.....	35
Foto 14: Ensayo típico de flexión estática de una viga.....	35
Foto 15: Determinación de f_1 y f_2 utilizando comparadores con apreciación de 0,01 mm.....	37
Foto 16: Máquina Electromecánica Universal, con una capacidad de 300 kN.....	40

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

- AENOR** Asociación Española de Normalización y Certificación
- AMAYADAP** Asociación Maderera Aserraderos y Afines del Alto Paraná.
- ASTM** American Society for Testing and Materials (Asociación Americana de Ensayo y Materiales).
- CEN** Comité Europeo de Normalización
- CEN/TC** Comité Europeo de Normalización / Comité Técnico
- CIRSOC** Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles.
- CITEMA** Centro de Investigación y Desarrollo de la Industria de la Madera y Afines.
- EN** Norma Europea
- FRP** Fiber Reinforced Polymer.
- GEMA** Grupo de Estudios de Madera (Facultad Regional Concepción del Uruguay).
- INTI** Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- IRAM** Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- LSD** Least significant difference
- MOE** Módulo de Elasticidad a la Flexión Estática.
- MOR** Módulo de Rotura a la Flexión Estática.
- MUF** Melamina-Urea-Formol.
- PSF** Punto de Saturación de las Fibras.
- RITIM** Red de Instituciones de Desarrollo Tecnológico de la Industria de la Madera.
- TC** Comité Técnico
- U.T.N.** Universidad Tecnológica Nacional.
- UHMWPE** Ultra-high-molecular-weight polyethylene (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular).
- UNaM** Universidad Nacional de Misiones.
- UV** Ultra Violeta.
- VLM** Vigas Laminadas de Madera.

1- INTRODUCCION

Los primeros intentos por establecer un marco normativo sobre el producto viga laminada de madera datan del año 2000, donde en la sede de IRAM en Buenos Aires, se realizó la primera reunión de la Comisión de - Sub Comité Maderas para la Construcción. En el mismo año, se suman al Proyecto la RITIM (1) y entre los años 2003 y 2004, se ensayaron cientos de probetas de *finger -joint* y de vigas laminadas en las especies *Pinus elliotii/taeda*, *Araucaria angustifolia* en FCF y *Eucalyptus grandis*, siendo las mismas sometidas a ensayos destructivos en los laboratorios de: CITEMA – INTI y de la U.T.N., a cargo del Grupo GEMA y el Departamento de Tecnología de la Facultad de Ciencias Forestales, UNaM. Los mismos tuvieron como objetivo determinar los valores característicos que serían base para la redacción de la norma. En el año 2005 se procedió a realizar la redacción final, enviada posteriormente a discusión pública y en el año 2006 se aprobaron y publicaron las normas IRAM: 9660-1 “Clases de resistencia y requisitos de fabricación y control” (2), 9660-2 “Métodos de Ensayo” (3), 9661 “Requisitos de los empalmes unión dentada” (4), 9662-1, 9662-2 “Clasificación visual de las tablas por resistencia-eucaliptus” y 9662-3 “Clasificación visual de las tablas por resistencia *Pinus elliotii/taeda*” (5) y 45055 “Adhesivos para estructuras de madera bajo carga” (6), 9663 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de propiedades físicas y mecánicas” (7).

En FITECMA “Feria Internacional y Tecnología de la Madera”, que se realiza en la ciudad de Buenos Aires en el año 2011, la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Buenos Aires juntamente con el IRAM, presentaron un módulo sobre la creciente utilización de la madera como elemento estructural y arquitectónico para la construcción de viviendas de alta gama y en naves de edificios de construcción horizontal. Por su parte, en el mismo evento, el IRAM informo que se elaboró un reglamento para el cálculo de madera de uso estructural y se envió a distintos organismos para su análisis, evaluación, aportes y comentarios. Esta reglamentación entró en vigencia a partir del 2013, tomando el nombre de CIRSOC 601(8). Por otra parte, uno de los temas

actuales que se debate permanentemente en nuestro país es la falta de viviendas familiares para cubrir las necesidades del crecimiento poblacional, donde la construcción de viviendas de madera tiene un futuro prometedor hasta ahora poco explotado.

Frente a este panorama alentador y conociendo además el potencial maderero que tiene nuestro país y particularmente el beneficio en cuanto al crecimiento que tienen las especies que se utilizan para la fabricación de VLM y otros componentes estructurales, se infiere que las expectativas que se abren son grandes y desafiantes para seguir desarrollando productos de mayor calidad, con una relación peso/resistencia más baja.

Desde el punto de vista social, económico y ambiental, el eficiente aprovechamiento de la madera que se utiliza en la fabricación de VLM, es determinante para ser competitivo al atender las demandas de un potencial mercado que además exige innovación en el diseño de los productos para la construcción. Esto conduce a que se investiguen nuevas alternativas, nuevas formas y dimensiones, que minimicen la relación peso/resistencia y logren una mayor confiabilidad en el producto especificado. De allí la conveniencia de incrementar los niveles de resistencia de las VLM que actualmente se fabrican y los coeficientes de seguridad, como uno más de los ítems a tener en cuenta.

La inquietud surge de la necesidad de buscar satisfacer la demanda creciente de maderas estructurales y poner a disposición del mercado productos nuevos que permitan a los constructores y arquitectos, tener nuevas posibilidades para los diseños que puedan presentarse. La producción de VLM permite disponer de piezas estructurales de alta estabilidad dimensional, que pueden salvar luces mayores que las que se logran con vigas de madera maciza, con la particularidad de que no solamente pueden ser rectas, sino también tener diferente curvatura (Foto 1).



Foto 1: Estructuras construidas con vigas laminadas de madera

La incorporación de cordones para mejorar las características mecánicas, permitirá ofrecer un producto innovador que garantice mayor confianza a los profesionales de la construcción, mejorando sus diseños y haciéndolos más atractivos para quienes tienen que tomar la decisión a la hora de invertir dinero. En consulta personal con profesionales del IRAM e INTI Maderas, respecto al estado de arte en materia de investigación de las VLM que actualmente se llevan adelante en nuestro país, la respuesta fue que más allá de lo que está plasmado en las normas, no se ha desarrollado ninguna otra investigación. En otros países, hay trabajos realizados que utilizaron laminados de FRP (9) y en otro caso cables de acero (10) como refuerzo.

1.1 Hipótesis

Es posible el incremento de la resistencia de las VLM que actualmente se fabrican en el país bajo las normas vigentes mediante la incorporación de cordones sintéticos.

1.2 Objetivos

Se plantean los siguientes objetivos.

1.2.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento mecánico de las VML incorporando una cierta cantidad y adecuada distribución de cordones flexibles sintéticos de alta resistencia a la tracción, ubicándolos en alojamientos individuales en el sentido longitudinal de la viga y en la zona de tracción, lo más alejado posible del eje neutro y aplicándoles un cierto grado de pretensión en el armado.

1.2.2 Objetivos específicos

La evaluación contempla cuatro situaciones:

- Seleccionar un determinado tipo de cordón, que sea compatible con los adhesivos utilizados.
- Definir la cantidad de cordones, su distribución en el ancho de la VLM y la pretensión a aplicar a los mismos.
- Determinar el MOR, y el MOE y la carga máxima de rotura por medio de los ensayos característicos y comparar los resultados con los productos estándares que se fabrican, utilizándolos como testigos.
- Comparar los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas con las Clases de Resistencia indicadas por la Norma IRAM y la Norma Europea UNE-EN 1194.

1.3 Variables

A- Independientes

- Cantidad de cordones.
- Pretensión aplicada a los cordones.

B- Dependientes

- Módulo de rotura a la flexión estática: MOR (N/mm^2).
- Módulo de elasticidad a la flexión estática: MOE (N/mm^2).
- Carga de rotura a la flexión estática: $P_{\text{máx.}}$ (N)

2- REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Vigas laminadas

La madera es un producto natural y un recurso renovable, estéticamente agradable, pero una de sus principales características es la variabilidad en sus propiedades físicas y mecánicas hasta en árboles de una misma especie y de una misma plantación. Esta variabilidad es la que se requiere controlar y mediante técnicas selectivas, clasificar la madera para fabricar vigas laminadas bajo los estándares de seguridad vigentes (1) (5). Las propiedades físicas son aquellas que determinan su comportamiento, ante los factores que intervienen en el medio ambiente natural, sin que este actúe química ni mecánicamente en la estructura interna, como por ejemplo la humedad (1). El agua libre, es la existente en los capilares gruesos y en los espacios intercelulares de la madera por arriba del denominado PSF, o sea superior al 28-30% de contenido de humedad. El agua de impregnación se encuentra ocupando los espacios submicroscópicos de la pared celular y ligada a la misma por fuerzas eléctricas polares, con porcentajes de humedad de la madera comprendido entre el 6% y el PSF. El agua de absorción química retenida en forma de capa gaseosa monomolecular en la superficie celular por fuerzas de Van der Waals y puente de hidrógeno, con porcentajes de humedad entre 0% y el 6%. En un árbol luego de ser aserrado y apilado, la madera disminuye su tenor de humedad por evaporación, siendo el agua libre el primero que se pierde. Solo después de la pérdida total del agua capilar comenzará a perderse el agua de impregnación. La mayoría de las propiedades físicas y mecánicas de la madera presentan muy pocas variaciones con porcentajes de humedad superiores al PSF y por el contrario pasan a depender estrechamente del mismo a partir del PSF hacia humedades menores. La eliminación del agua libre altera poco la madera en sí, a no ser su peso y por el contrario, la salida del agua de impregnación provoca importantes modificaciones estructurales en cuanto a rigidez y resistencia. En la Figura 1 se observan algunas propiedades de la madera en relación al contenido de humedad. El estudio de estas propiedades tiene gran importancia,

en las diferentes aplicaciones de la madera, particularmente la madera de uso estructural (11).

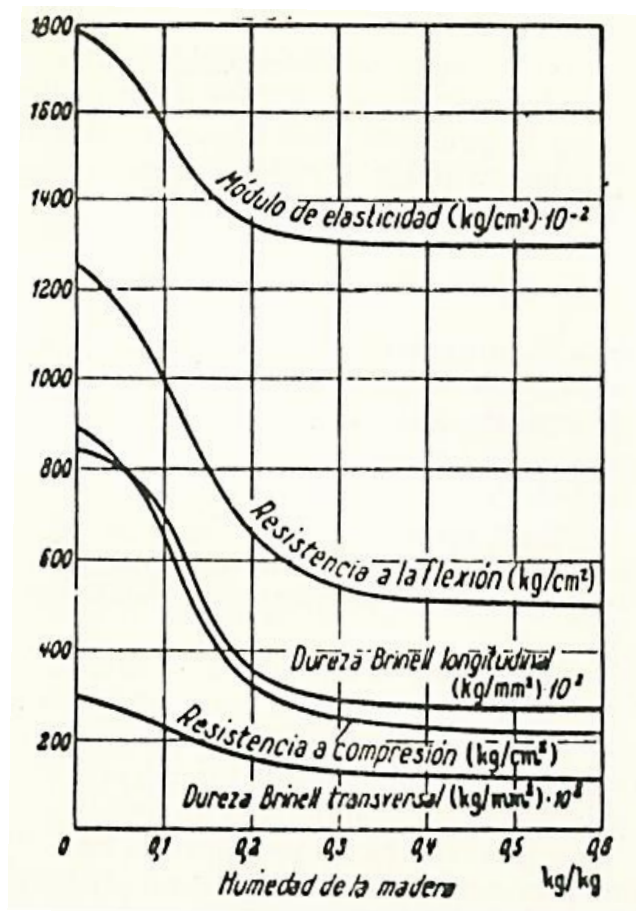


Figura 1: Dependencia de algunas propiedades de la madera en función del contenido de humedad. Fuente: Coronel E. (11)

La madera natural tiene nudos (Foto 2) y otros defectos que provocan alteraciones y discontinuidades en las fibras, siendo los nudos la particularidad anatómica con mayor influencia sobre la resistencia a flexión de la madera. Cuando los nudos están ubicados en la zona de mayor esfuerzo, particularmente de tracción de las fibras, provocan una disminución de las propiedades mecánicas, ya que los mismos poseen un efecto significativo sobre la resistencia de la madera, lo cual es más notorio en las coníferas debido a su forma de crecimiento. En condiciones naturales, el fuste de coníferas presenta gran cantidad de ramas que al convertirse en madera aserrada se manifiestan como nudos (12).

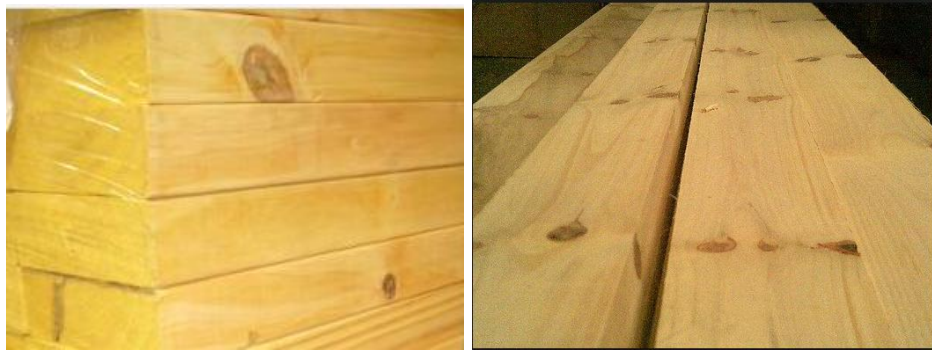


Foto 2: Vigas macizas de madera donde se observan los nudos

La cuantificación de la influencia de los nudos en la resistencia a la flexión se puede obtener con la siguiente fórmula expresada en %, que fue graficada para visualizar su variación (Figuras 2 y 3) (13):

$$F_m = 1 - (k / h)^2$$

Siendo:

h = altura de la sección; k = altura del nudo en la sección; F_m = resistencia a la flexión en %

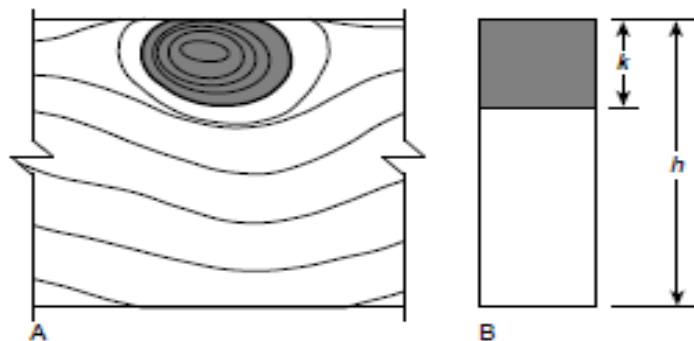


Figura 2: Efecto del nudo de borde, A: nudo en el borde de una viga; B: pérdida de la sección transversal (área sombreada).

Fuente: Wood Handbook (13)

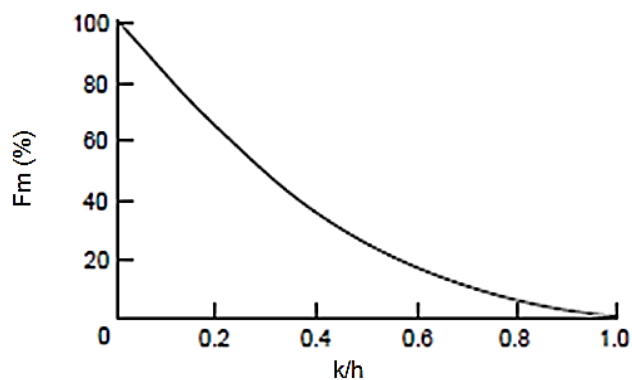


Figura 3: Curva de resistencia a la flexión % en función de la relación k/h
Fuente: Wood Handbook (13)

En el proceso de aserrado se producen distintas escuadrías que son utilizadas para una amplia variedad de elementos estructurales. Sin embargo, las dimensiones de la sección transversal y la longitud de estos productos están limitadas por el tamaño de los rollos de madera disponibles. Estas limitaciones hacen que la madera compuesta por láminas (Foto 3) sea considerada por la industria como un mejoramiento de la madera maciza. Siendo posible, a partir de las láminas, fabricar vigas y estructuras con mayores dimensiones, para cubrir grandes luces y de las que se resaltan sus propiedades físico mecánicas, no sólo comparada con la madera maciza, sino también con materiales tradicionales para la construcción como el acero y el concreto. Frente a estos materiales, la madera laminada a simple vista está un paso más adelante por sus cualidades estéticas, por su resistencia mecánica y comportamiento en incendios. En regiones como Estados Unidos, Europa, Asia, y algunos países latinoamericanos como Chile, Argentina y Brasil, los beneficios de este material han sido bien aprovechados y ampliamente difundidos considerando las grandes cantidades de madera laminada que producen (14).



Foto 3: Vigas laminadas de madera

Las VLM se presentan en piezas de madera seca, maciza, con sección transversal rectangular, de resistencia incrementada, con un ancho fijo y una altura constante o variable, de eje recto o curvo, constituidas por láminas o tablas con espesores entre los 16 y 45 mm, excepcionalmente 50 mm, que se arman con piezas seleccionadas de madera ya elaborada, seca y libres de defectos, haciendo un dentado en los extremos de cada trozo y unidos a

presión con un adhesivo resistente (1) (6) (14). El dentado se denomina *finger – joint* y debe respetar las formas y dimensiones indicadas en las normas (2) (4) (Foto 4).



Foto 4: *Finger – joint* para el armado de láminas

En países como Estados Unidos, ya se fabrican vigas laminadas de hasta 120 metros de largo. La normalización del proceso de fabricación y las ventajas que esto ofrece, ha favorecido la utilización de la madera laminada como alternativa en la industria de la construcción. No en vano, gracias a las propiedades que la industria ha logrado desarrollar en la madera laminada, esta se cataloga hoy, no sólo como un material para construir grandes estructuras de bajo peso (Foto 5), sino también como ideal por su alto grado de resistencia a los sismos, superior al de cualquier tipo de construcción en acero y concreto. La prueba de resistencia a los sismos de un edificio en Japón, hecho en madera de 7 pisos y 23 apartamentos fue sometido desde 6,7 a 7,5 grados de magnitud con resultado positivo (14).

En Argentina son varias las empresas que se dedican a la fabricación de VLM para uso estructural. En nuestro medio, según la organización AMAYADAP, podemos mencionar algunas: WALTÍ Hnos., MADEPAR S.R.L., FORESTAL ELDORADO S.R.L., LAHARRAGUE – CHODORGE S.A., NADKABE S.A.I.C., ESPERANZA S.A., FORESTEC S.A., MADERALPA S.R.L., DELICIA MADERAS S.A., TOLL MADERAS S.R.L., MAD SRL, y de otras provincias se pueden mencionar: WOOD SRL, Valerio Oliva SACIA. Se debe destacar que hay empresas que fabrican VLM sin la certificación de IRAM.



Foto 5: Estructuras construidas con vigas laminadas de madera

2.2 *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*

Las especies *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* son las que más se cultivan en nuestro país. Estudios realizados en las provincias de la Mesopotamia, han demostrado un desarrollo superior de estas especies respecto a otras, llegando a tener un crecimiento que promedia los 35 a 40 m³/ha/año (15), pudiendo alcanzar inclusive volúmenes mayores con un control de maleza (16). Esto ha permitido que muchas empresas utilicen la madera de estas especies para fabricar VLM, debido a que, además de su rápido crecimiento, este tipo de especies presentan adecuadas y similares características físicas y mecánicas que la hacen apta para su utilización en la fabricación de VLM (17).

2.3 Criterios de Dimensionamiento

Los factores que deben considerarse para evaluar y clasificar las VLM son: Módulo de rotura MOR, módulo de elasticidad MOE y carga máxima de rotura P_{max} a la flexión estática. Estos factores están relacionados directamente con el dimensionamiento de las vigas a utilizar, siendo para muchos casos el factor principal para el dimensionamiento, la tensión que se manifiesta en flexión (7) (Figura 4). Las VLM, a pesar de estar compuesta por láminas, para su dimensionamiento se las considera como una sección única maciza (18). Las tensiones en la sección transversal de una viga durante la flexión pura varían linealmente con la distancia en relación a la superficie neutra, siendo esta superficie el lugar geométrico de los puntos de la sección que cumple la condición de tensión nula (Figura 4), independientemente de la forma de la curva tensión-deformación del material. Las tensiones máximas de compresión y tracción se presentan en las fibras más alejadas de la línea neutra. Las deformaciones longitudinales en una viga son acompañadas por deformaciones transversales expresadas por el coeficiente de Poisson (19).

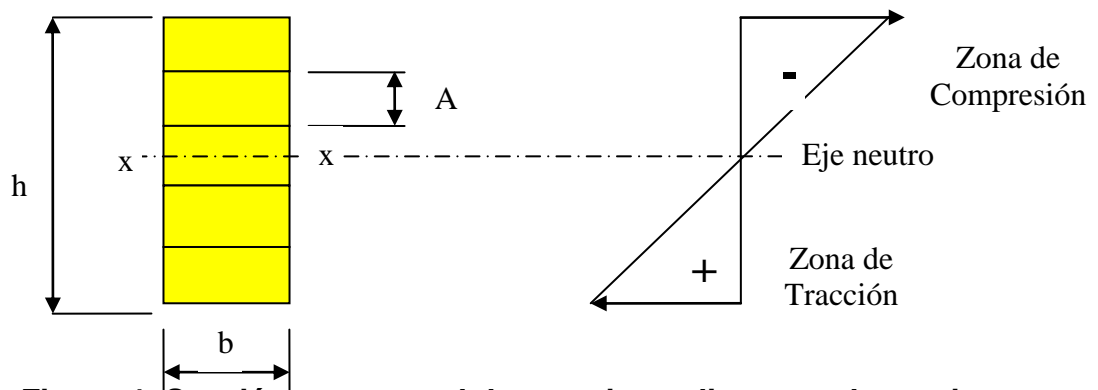


Figura 4: Sección transversal de una viga y diagrama de tensiones durante la flexión. Fuente: Ensayos Industriales (adaptado) (20)

2.4 Flexión estática

El empleo práctico de las maderas hace necesario conocer no solo las características físicas, como son la densidad, las contracciones lineales tangencial y radial, volumétrica, coeficiente de anisotropía y otras, sino que también y en forma fundamental su comportamiento mecánico. La madera en su utilización práctica se encuentra sometida a esfuerzos de flexión, lo que hace que los ensayos según esta sollicitación adquieran gran importancia. Pues permiten conocer su resistencia mecánica desde el punto de vista real, facilitando, además, por los valores que de él se obtienen, el estudio comparativo dentro de una misma especie, con otras especies o como en el caso que nos ocupa entre vigas (20). Observando la Figura 5, la flexión pura se presenta en las secciones que se encuentran entre las dos cargas P , allí el esfuerzo cortante es nulo y el momento flector permanece constante (21) (22). Por otra parte, la rotura de una viga se produce indistintamente en cualquier sección comprendida en dicho tramo, lo que se verifica en aquella que presente mayor debilidad la estructura fibrosa de la madera. La flexión transversal se presenta en las secciones que se encuentran entre las cargas P y los puntos de apoyo, allí el esfuerzo cortante permanece constante y el momento flector varía. Se denomina flexión estática porque la carga no varía en el tiempo y durante un ensayo la velocidad de aplicación de la carga es muy baja, simulando su invariabilidad en el tiempo. La Norma IRAM 9663 expresa: “La

probeta se debe cargar a flexión sobre dos puntos simétricos con una luz igual a 18 veces la altura de la sección transversal". La velocidad de aplicación de la carga no debe superar los $(0,003 h)$ mm/seg (7), siendo h la altura de la sección transversal en mm (Figura 4).

El esfuerzo de flexión que aparece en vigas sometidas a la acción de cargas normales a su eje longitudinal, provoca una curvatura del mismo y se producen tres esfuerzos fundamentales (Figura 4)

1-Esfuerzo de compresión que produce un acortamiento longitudinal de las fibras en la parte superior, indicadas con signo "''-''".

2-Esfuerzo de tracción que produce un alargamiento de las fibras en la parte inferior, indicadas con signo "''+'''".

3-En caso de flexión transversal, aparece esfuerzo de corte o cizalle que tiende a seccionar las fibras.

La combinación de los dos primeros esfuerzos origina que la viga adopte una forma cóncava en la zona de compresión y una forma convexa en la zona de tracción (Figura 5).

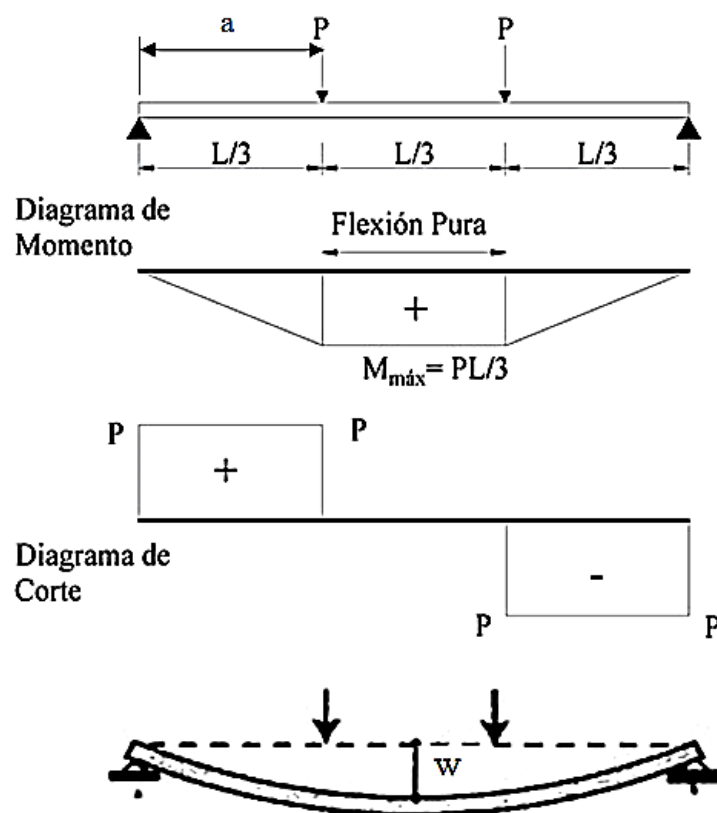


Figura 5: Diagramas de Momentos Flectores, de Esfuerzos de Corte y flecha de descenso. Fuente: Ensayos Industriales (adaptado) (20)

Del hecho de que las tensiones en la misma sección transversal tengan distinto signo, se deduce que deberán existir puntos de ella para los cuales los esfuerzos sean nulos. Dichos puntos determinan una recta a la que se denomina eje neutro; la coincidencia de los ejes neutros de todas las secciones determina el plano o fibra neutra de toda la viga. Por lo expuesto, la fibra neutra no experimenta ninguna deformación y divide a la viga en dos zonas, una sometida a esfuerzos de tracción y otra a esfuerzos de compresión (20).

En la Figura 6 se muestra la distribución de tensiones en gráficos superpuestos que representan los esfuerzos de tracción y compresión de las fibras extremas, o más alejadas del eje neutro, en la sección de rotura, en función de los momentos flectores, durante un ensayo de flexión de una probeta de pino (20).

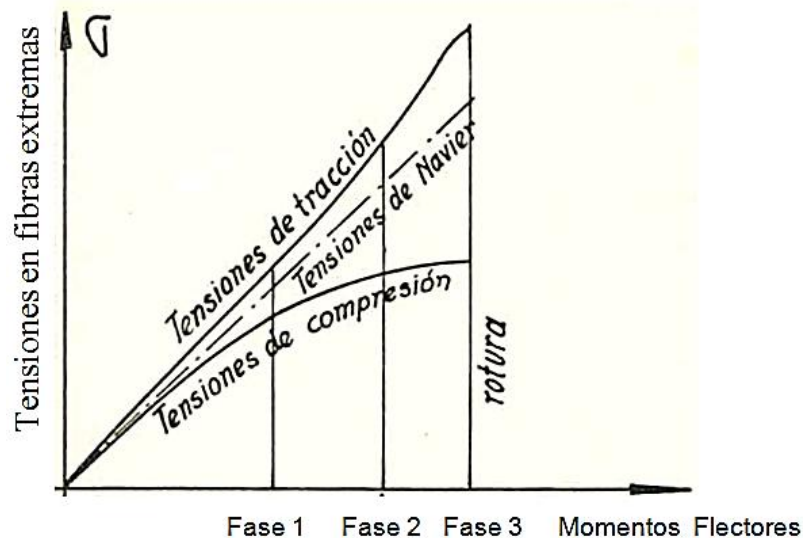


Figura 6: Distribución de tensiones de las fibras extremas respecto a los momentos flectores. Fuente: Ensayos Industriales (20)

En la Figura 6 se observan las variaciones que tienen lugar entre las tensiones en tres instantes característicos del ensayo. La Fase 1 corresponde al periodo elástico de las fibras, las cuales experimentan prácticamente iguales tensiones y deformaciones. Cuando las secciones llegan al límite elástico, que corresponde a la Fase 2, la tensión de compresión difiere de la de tracción. A partir del límite elástico mencionado, las fibras traccionadas son sometidas a aumentos considerables de las tensiones hasta la rotura, que corresponde a la Fase 3, sin marcados alargamientos, mientras que las fibras comprimidas sufren deformaciones permanentes. Al realizar un ensayo de flexión sobre una

probeta de pino se obtuvo una resistencia de tracción calculada por la ecuación de Navier 1,7 veces superior a la de compresión (20).

Se denomina viga a la barra o pieza que trabaja principalmente a flexión y se entiende por flexión el caso de sollicitación cuando en las secciones transversales, en nuestro caso de vigas, aparecen momentos flectores. Si el momento flector en la sección es el único factor de fuerza existente, mientras que las fuerzas cortantes y la fuerza normal son nulas, entonces la flexión se denomina Flexión Pura (Figura 4) y en el caso que simultáneamente a los momentos flectores, aparecen también fuerzas cortantes, entonces se denomina Flexión Transversal (23) (24) (25).

Debido a la anisotropía de la madera, que es la característica que presenta un material según la cual determinadas propiedades y comportamiento son diferentes en función de la dirección en las que son medidas, se deberá estudiar las propiedades mecánicas teniendo en cuenta esta característica de la madera. Las direcciones principales que se estudian son tres: Tangencial, radial y axial o longitudinal (Figura 7)

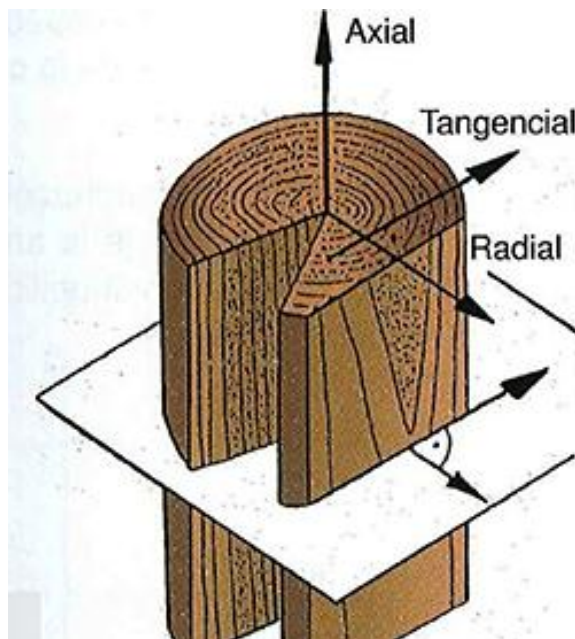


Figura 7: Principales direcciones de la madera
Fuente: Química Tháí S.L. (26)

La madera se comporta en forma distinta frente a los esfuerzos de tracción o compresión y estas tensiones a su vez difieren si el esfuerzo aplicado es paralelo o perpendicular a la dirección de las fibras. En la generalidad de los

casos la resistencia a la tracción paralela a las fibras es mayor que la resistencia a la compresión paralela a las fibras. Si observamos el diagrama tensión - deformación en tracción y en compresión de la Figura 6, se aprecia que los módulos de deformación de la madera son bastante desiguales siendo el de tracción del orden de un 50% superior al de compresión, además, la resistencia a tracción prácticamente duplica a la de compresión. (Figura 8) (27)

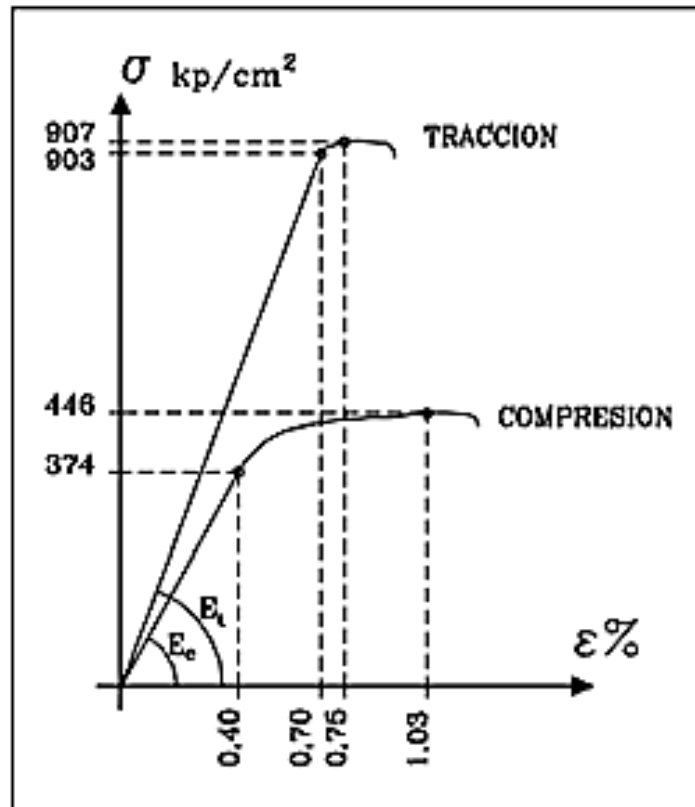


Figura 8: Ensayo típico de resistencia a la tracción y compresión paralela a las fibras de la madera. Fuente: (27)

Debido a las consideraciones hechas anteriormente, cuando la madera es sometida a flexión, se genera una diferencia no solo en el estado de tensiones a igual distancia del eje neutro sino que también en las deformaciones que se producen, como consecuencia no pueden ser considerados como reales los valores de los esfuerzos obtenidos con la fórmula de Navier, que toma como base la proporcionalidad de dichas tensiones y deformaciones.

La Figura 9 indica las variaciones que tienen lugar entre las tensiones y deformaciones de una sección transversal en tres fases características del ensayo de flexión.

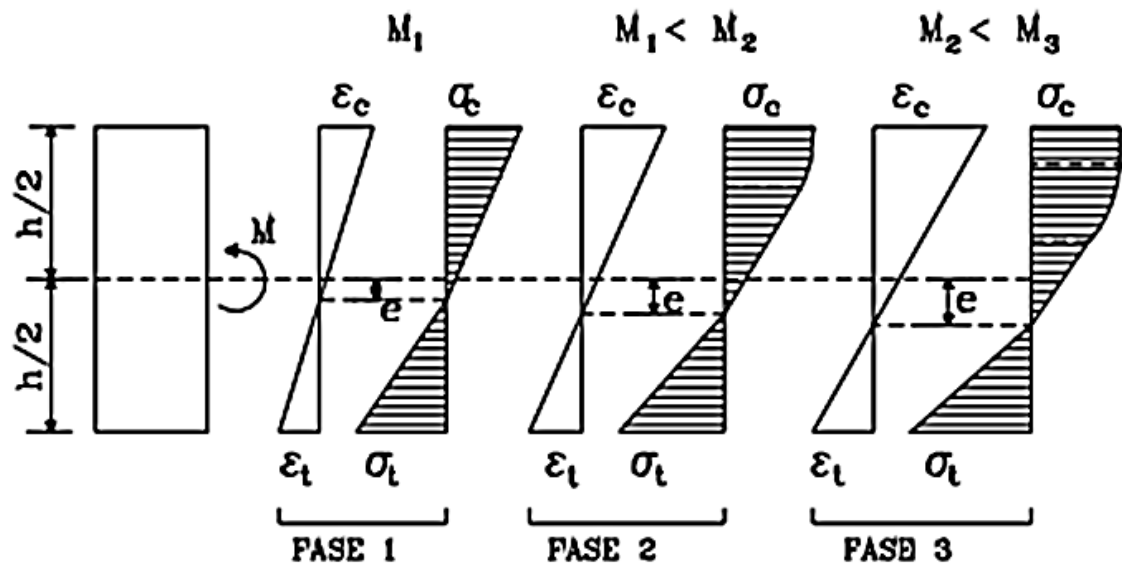


Figura 9: Fases características de tensiones y deformaciones del ensayo de flexión. σ_c y σ_t = tensiones de compresión y tracción respectivamente; ϵ_c y ϵ_t = deformaciones por compresión y tracción respectivamente; M_1 ; M_2 ; M_3 = momentos flectores; e = desplazamiento del eje neutro; h = altura de la sección. Fuente: (27)

Fase 1: Periodo elástico de las fibras para ambos esfuerzos, las cuales experimentan prácticamente iguales tensiones y deformaciones.

Fase 2: Se presenta cuando el material se encuentra en el límite elástico donde se observa que las tensiones de compresión han dejado de cumplir con la ley lineal, tomando valores inferiores a los equidistantes de tracción, debido a las deformaciones plásticas que se presentan en la zona comprimida. Esto origina el desplazamiento del eje neutro hacia el sector más resistente para mantener la igualdad de la resultante de las fuerzas de tracción y compresión cuyos momentos equilibran al de las fuerzas exteriores.

Fase 3: Se ponen de manifiesto las tensiones máximas o de rotura, las que difieren con las calculadas mediante la fórmula teórica de Navier que da resultados menores que los reales para la zona de tracción y mayores para la zona de compresión (Figura 9).

La ecuación de Navier aplicada a una viga de sección rectangular (Figuras 4) es la siguiente (21):

$$\sigma_r = \frac{M \cdot y_{\max}}{I_x}; \quad \text{donde: } W_x = \frac{I_x}{y_{\max}} = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$\sigma_r = \frac{6 \cdot P_{\max} \cdot a}{b \cdot h^2}$$

La norma IRAM 9663 para una sección rectangular aplica la ecuación (7):

$$F_m = \frac{3 \cdot P_{\max} \cdot a}{b \cdot h^2}$$

Siendo:

P_{\max} = Carga de rotura en N.

W_x = módulo de la sección mm^3

I_x = momento de inercia de la sección mm^4

y_{\max} = $h/2$, distancia de la fibra más alejada medida desde el eje neutro en mm

b = base en mm.

h = altura en mm.

a = $L/3$ distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en mm.

σ_r y F_m = tensión de rotura en un ensayo de flexión N/mm^2

De acuerdo a las consideraciones realizadas, el cálculo de resistencia a la flexión se hizo de acuerdo a la ecuación indicada por norma IRAM 9663, que corresponde a la mitad del valor dado por la ecuación de Navier.

2.5 Módulo de elasticidad a la flexión estática MOE

Otro de los objetivos principales del ensayo de flexión, es el de determinar el módulo de elasticidad longitudinal de la madera, que representa su mejor índice de rigidez (20).

Antes que surgiera un masivo intercambio comercial de madera entre los países, no había un criterio único para la determinación del MOE y se utilizaban diferentes procedimientos. Esta situación provocó que el ensayo sea diferente según el instituto de investigación en el que se haya realizado, así en el Swedish National Testing, en el Norwegian Institute of Wood Technology, y en el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y en el Technical Research Centre of Finland el captador se situaba sobre la fibra neutra, mientras que en el Swedish Institute for Wood Technology Research la medición se tomaba en la zona tensionada.

Dentro del sector europeo de la madera, el Comité encargado de normalizar sobre la madera aserrada de uso estructural es el CEN/TC 124, competente en materia normalizadora de los productos destinados al mercado estructural y creado en 1987. Este comité se encargó de la normalización de las dimensiones preferentes y tolerancias (EN 336), de las clases resistentes (EN 338), del método de cálculo de los valores característicos (EN 384), de los métodos de ensayo de las propiedades mecánicas y físicas (EN 408) y de los requisitos necesarios para la clasificación visual o mecánicamente (EN 14081). Por tanto, este Comité incluye la norma que especifica el procedimiento para realizar los ensayos (EN 408), de forma que se obtengan valores que permitan compararlos con los de otros países o procedencias. Si la comparación se realiza fuera de Europa, se observa que los norteamericanos (estadounidenses y canadienses), australianos y neozelandeses realizan un ensayo de determinación del módulo de elasticidad en flexión estática diferente al europeo. Estas diferencias de métodos llevaron a que se busque unificar criterios para definir los diferentes tipos de calidades comerciales de la madera estructural. Por lo tanto, existen dos procedimientos de ensayo distintos y el resultado final dependerá de cuál de ellos se escoja para introducirlo en las clases resistentes. Estos procedimientos definen un MOE local y un MOE global. Esta diferencia se debe a que la determinación del primero solo está

influenciado por esfuerzos de flexión pura, en tanto que el segundo, incluye un aspecto resistente importante como es el efecto del esfuerzo cortante, que es el principal causante de disminuir su valor respecto al módulo local. Otra causa de la disparidad en los resultados son los defectos presentes en la madera, su influencia en el módulo global es mucho mayor que en el local (28).

Los correspondientes pares de valores carga/deformación en período elástico necesario para calcular el MOE local (E_{ml}) y MOE global (E_{mg}) deben ser calculados por las siguientes expresiones (7):

$$E_{ml} = \frac{a L_1^2 (P_2 - P_1)}{16 I_x (w_2 - w_1)} \quad [1]$$

$$E_{mg} = \frac{3 a L^2 - 4 a^3}{2 b h^3 [2 (w_2 - w_1)/(P_2 - P_1)]} \quad [2]$$

Siendo:

$P_2 - P_1$ = Incremento de carga en la recta de regresión en N.

$w_2 - w_1$ = Incremento de deformación correspondiente a $P_2 - P_1$ en mm.

L = longitud entre apoyos mm.

L_1 = longitud entre apoyos del soporte medido sobre el eje neutro en mm.

b = base en mm; h = altura en mm.

E_{ml} = módulo de elasticidad local en flexión estática N/mm².

E_{mg} = módulo de elasticidad global en flexión estática N/mm².

I_x = momento de inercia de la sección en mm⁴

Los valores P , f_1 y f_2 (Figura 10) de cada ensayo son leídos cada 10 segundos desde que se inicia el ensayo de flexión leyendo f_1 y f_2 indicado por los instrumentos y hasta que la carga aplicada adquiere un valor del 40% de la carga de rotura, habiendo sido obtenida previamente esta última con un ensayo testigo. Los valores que se toman de la recta de regresión para el cálculo son

aquellos con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor y que estén dentro del tramo de la recta comprendidos entre $P_1 = 0,2 P_{\max}$ y $P_2 = 0,3 P_{\max}$ con sus respectivos valores de w_1 w_2 .

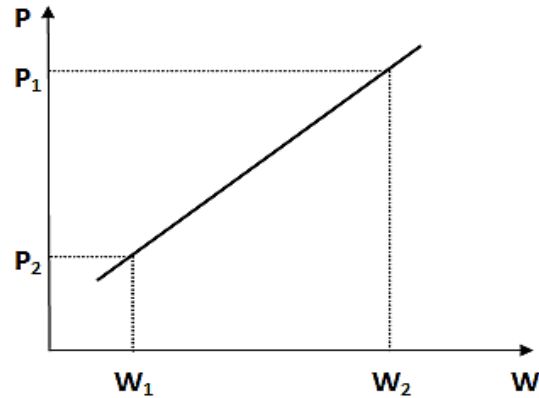


Figura 10: Grafico de carga – deformación dentro de los márgenes de deformación elástica. Fuente: Norma IRAM 9663 (7)

Con estos valores de carga y los correspondientes valores de las deflexiones se calculan los valores de E_{m1} y E_{m2} (7).

Cuando se habla de MOE local y MOE global se debe considerar que el primero se determina en la zona de la viga donde se presenta solamente esfuerzo de flexión pura, no existiendo esfuerzo de corte, en tanto que el segundo se encuentra bajo la influencia no solo del esfuerzo de flexión sino también del esfuerzo de corte, esto determina que aparezcan diferencias entre los valores de ambos, siendo los valores del MOE local superiores. Una de las ventajas de la determinación del MOE global en vez del MOE local es que en el primero resulta más fácil de medir las deformaciones durante el ensayo, particularmente para las pequeñas vigas y tablas planas. Los resultados de los ensayos realizados con especies de *Eucalyptus grandis*, indican que la utilización del MOE global en vez del MOE local, aumenta la seguridad, lo que sitúa en el lado conservador el grado de resistencia. El diseño estructural de acuerdo con los dos estados, límite último y de servicio, también se encuentran del lado de la seguridad si se emplean los valores característicos del MOE global en lugar del MOE local. Con las especies de *Eucalyptus grandis* los resultados de los ensayos mostraron que el MOE local exhibió valores medios 6% a 7% mayor que los correspondientes MOE globales. Se realizaron ensayos con la especie *Pinus sylvestris L.* y las diferencias entre los valores del

MOE local, arrojaron valores medios de hasta 7% superiores al MOE global. Esta diferencia se debe a que el módulo de elasticidad global incluye un aspecto resistente importante como es el efecto del esfuerzo de corte, como el principal causante de disminuir su valor respecto al módulo local, similar a lo ya visto para el *Eucalyptus grandis*. Otra causa de la disparidad obtenida son los defectos presentes en la madera, su influencia en el MOE global es mucho mayor que en el MOE local. Una ventaja del MOE global frente al MOE local radica en la sencillez de su determinación y en el hecho de que se reproducen mejor las condiciones reales de utilización del elemento ensayado (29).

De acuerdo a lo que se acaba de analizar, si bien en este trabajo se muestra cómo se han medido durante los ensayos los valores del MOE local y MOE global, en este trabajo de investigación se utilizaron solamente los valores obtenidos del MOE global para definir el Módulo de Elasticidad a la flexión estática de cada ensayo y fueron los que se utilizaron en los resultados y conclusiones.

2.6 Módulo de rotura a la flexión estática MOR

Uno de los objetivos principales del ensayo de flexión, es el de determinar la tensión que se alcanza en la madera en el momento de la rotura (20). Esta se calcula por la siguiente expresión (7):

$$\text{MOR} = \frac{3 \cdot P_{\text{max}} \cdot a}{b \cdot h^2} \quad [3]$$

Siendo:

P_{max} = Carga de rotura en N.

b = base en mm.

h = altura en mm.

a = L/3 distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en mm.

MOR = módulo de rotura a la flexión estática en N/mm².

2.7 Valores característicos de la madera laminada encolada estructural

Las normas IRAM 9660-1 proveen una tabla de referencia con los valores característicos (Tabla 1)

Tabla 1: Valores característicos para vigas laminadas de madera – *Pinus taeda/elliottii*. Fuente: Norma IRAM 9660 (11)

Grado de Resistencia	Módulo de Rotura MOR N/mm ²	Módulo de elasticidad en flexión MOE N/mm ²
Grado 1	20	12500
Grado 2	13	7500

2.8 Adhesivos

Se define adhesivo como aquella sustancia que aplicada entre las superficies de dos materiales permite una unión resistente a la separación y se denomina sustratos o adherentes a los materiales que se pretenden unir por mediación del adhesivo (Figura 11). El conjunto de interacciones físicas y químicas que tienen lugar en la interface adhesivo/adherente recibe el nombre de adhesión (30).



Figura 11: Esquema básico de una unión mediante adhesivo. Fuente: (30)

Los adhesivos son puentes entre las superficies de los sustratos, tanto si son del mismo material, como si son de distinto material. El mecanismo de unión depende de (Figura 12):

- La fuerza de unión del adhesivo al sustrato o adhesión
- La fuerza interna del adhesivo o cohesión

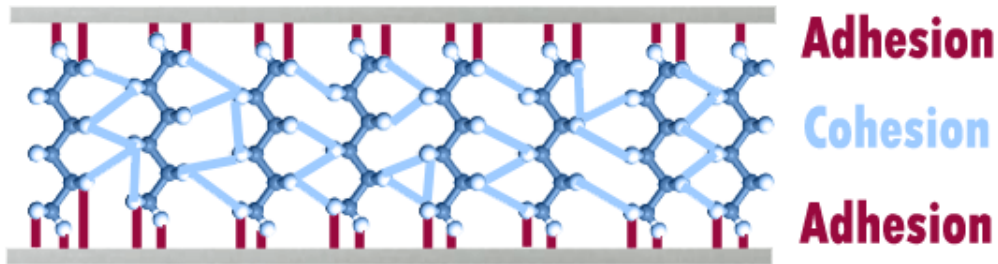


Figura 12: Diferenciación entre adhesión y cohesión. Fuente:(31)

Todo material que mantiene unidas dos piezas, de forma que las piezas unidas resistan los esfuerzos físicos y mecánicos, se denomina adhesivo. La unión de madera con adhesivos se realiza por mecanismos fisicoquímicos. La adherencia es el esfuerzo de la capa molecular del adhesivo que entra en contacto con la capa superficial de los sustratos, tales como la madera. En general, la madera es fácil de adherir en comparación con la mayoría de sustratos. Las superficies del sustrato no son atraídas uniformemente en un contacto tan cercano, requiriendo del adhesivo para mantener a las superficies unidas. Tanto para maderas laminadas como para otras uniones de materiales, los adhesivos pueden ser curados por calor o bien a temperatura ambiente. La unión se realiza de una forma muy compleja que incluye aspectos mecánicos, físicos y químicos.

El primer paso para la formación de la unión implica esparcir el adhesivo sobre la superficie de madera. El periodo de ensamblado de las vigas laminadas va desde la aplicación del adhesivo sobre la primera lámina hasta la aplicación del prensado final. Todo esto debe ser realizado mientras el adhesivo se mantiene en estado fluido.

Se distinguen dos etapas:

- a- Ensamblado abierto
- b- Ensamblado cerrado

La primera etapa es el tiempo de aplicación del adhesivo sobre una de las caras de las láminas, mientras que la segunda es cuando entran en contacto las láminas a adherir, una con el adhesivo y la otra libre de adhesivo, con la aplicación de presión. Esta última etapa es la que demanda el mayor tiempo debido a que antes de aplicar presión se debe armar el conjunto de láminas.

La etapa "a" debe ser más corta porque el curado del adhesivo en contacto directo con el aire es más rápido que cuando se encuentra encerrado entre laminas como ocurre en la etapa "b" (1) (32).

El adhesivo que se utilizó en la presente investigación fue denominado MUF que es el resultado de la reacción del formol sobre una mezcla de melamina y urea. Los encolados realizados con MUF presentan resistencia al agua, a la intemperie, al envejecimiento y permiten obtener encolados de mayor cohesión. Este tipo de adhesivo ha desplazado a otros por razones de menor toxicidad y olores y de fácil aplicación con prestaciones mecánicas similares (33).

2.9 Fibras de Polietileno - Dyneema

El material que se utilizó para reforzar las VLM es el Dyneema, fabricado con finísimas fibras de polietileno. Respecto a las fibras de alto rendimiento basadas en polietileno, las más utilizadas comercialmente son las familias Dyneema y Spectra. Ambas fibras se obtienen a través de procesos patentados de gel-spinning a partir de UHMWPE. Este proceso orienta las macromoléculas en una misma dirección, lo que origina la gran rigidez de la fibra, y que se traduce en una fibra resistente, que soporta una alta capacidad de absorción de energía. Presentan un extraordinario comportamiento visco-elástico, lo que las hace especialmente resistentes al impacto, y muestran una alta resistencia a agentes químicos, agua y radiación UV debido a su naturaleza no polar (34).

El UHMWPE está definido por ASTM como "polietileno con un peso molecular de más de tres millones (promedio en peso)". Muestra propiedades típicas de inactividad química y resistencia eléctrica, mientras que sus largas sustancialmente cadenas lineales ofrecen una mayor resistencia al impacto, resistencia a la abrasión, dureza, y la ausencia de la fisuración por tensión. También tienen alta resistencia al impacto a temperaturas muy bajas, alta

resistencia a la fatiga cíclica y agrietamiento por tensión, bajo coeficiente de fricción, buena resistencia a la corrosión y resistencia química, buena resistencia a las radiaciones nucleares, y resistencia al agua hirviendo (35).

3- MATERIALES Y METODOS

3.1 Materiales a utilizar

Las láminas de madera ensayadas correspondieron a las especies *Pinus taeda/elliottii*, fueron provistas por la empresa WALTI Hnos., ubicada sobre la Av. El Fundador en el municipio de Eldorado, Provincia de Misiones, fabricante de VLM (Foto 6). Cabe mencionar que para el armado de las láminas no se clasifica por especie, lo que significa que se realiza al azar.



Foto 6: Vigas Laminadas de *Pinus taeda/elliottii*

El agregado de los cordones (Foto 7) y el alojamiento a realizar en una de las láminas que componen una viga (Foto 8), formaron parte del proyecto de investigación para obtener una mayor resistencia, pero el tipo de láminas, los adhesivos y el montaje de las vigas se realizaron de acuerdo a los procedimientos de armado que utiliza la empresa, según las ya mencionadas normas IRAM. El cordón, llamado también cabo, fue provisto por la empresa Gaetani Hnos. S.C. ubicada en la Provincia de Buenos Aires. Sus especificaciones son: cabos trenzados integralmente con Dyneema Sk 75 de alta tenacidad y baja elongación, fabricados con finísimas fibras de polietileno, con una excelente resistencia a la tracción y bajo peso, comercializado como “Trenzado Dyextreme”. Cabe destacar que el Dyneema es una marca registrada de Royal DSM N.V. El cordón seleccionado tiene un diámetro de 4

mm, con un 3% de elongación al 100% de la carga de rotura, siendo esta última de 1060 kg o su equivalente 10600 N.

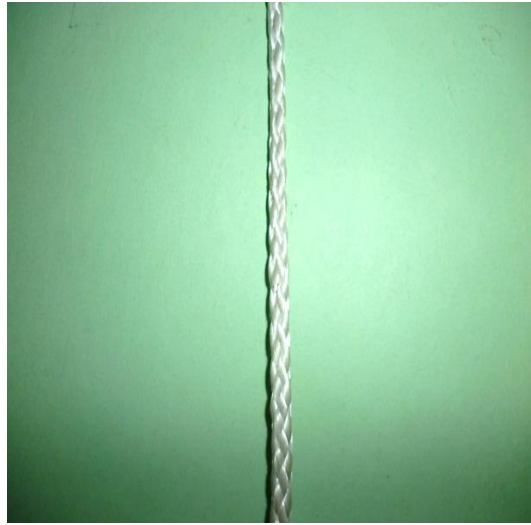


Foto 7: Tipo de cordón empleado



Foto 8: Ranuras realizadas en una lámina para alojar un cordón y en otra lamina para alojar dos cordones.

3.2 Determinación del tipo de muestras

3.2.1 Verificación del cordón

Se realizaron ensayos a fin de determinar qué factores pueden intervenir en la etapa experimental, como por ejemplo: el comportamiento del cordón en

contacto con el adhesivo, el grado de adherencia del cordón a la madera y otros a descubrir. Esta primera etapa consistió en la preparación de seis probetas (Foto 9), con las cuales se realizaron ensayos exploratorios y de ajuste antes de armar las vigas. Estos ensayos consistieron en determinar si existía deterioro del cordón y el grado de adherencia del cordón a la madera en una primera instancia. Para cada probeta se tomaron dos láminas de 15 mm de espesor, 50 mm de ancho y 200 mm de longitud, en una de las láminas se hizo una ranura longitudinal para alojar el cordón, sobresaliendo este 300 mm fuera de uno de los extremos de las láminas, luego se aplicó el adhesivo, se instaló el cordón y se prensó el conjunto. Luego se dejaron estacionar durante 12 días antes de realizar el ensayo (Foto 9). El ensayo consistió en sujetar, por un lado el cordón y por otro lado la madera, traccionando hasta que el cordón comenzó a deslizarse entre ambas láminas (Foto 10). Esto permitió observar lo siguiente:

- a- que no existió deterioro del cordón.
- b- la necesidad de aplicar pretensión a los cordones durante el armado de las vigas, para minimizar el efecto del trenzado, que provoca una elongación gradual a medida que crece la carga de tracción y lograr que las fibras del cordón queden alineadas con el sentido del esfuerzo.

El objetivo de estos ensayos se limitó a tener un conocimiento previo y como primera aproximación, del comportamiento e interacción de los materiales que se utilizaron para fabricar las muestras de VLM.

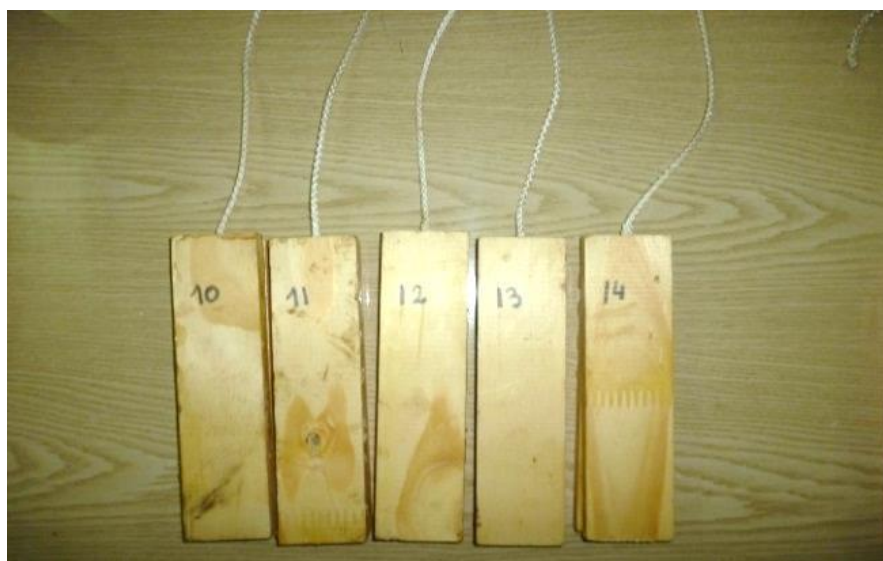


Foto 9: Probetas para ensayos exploratorios

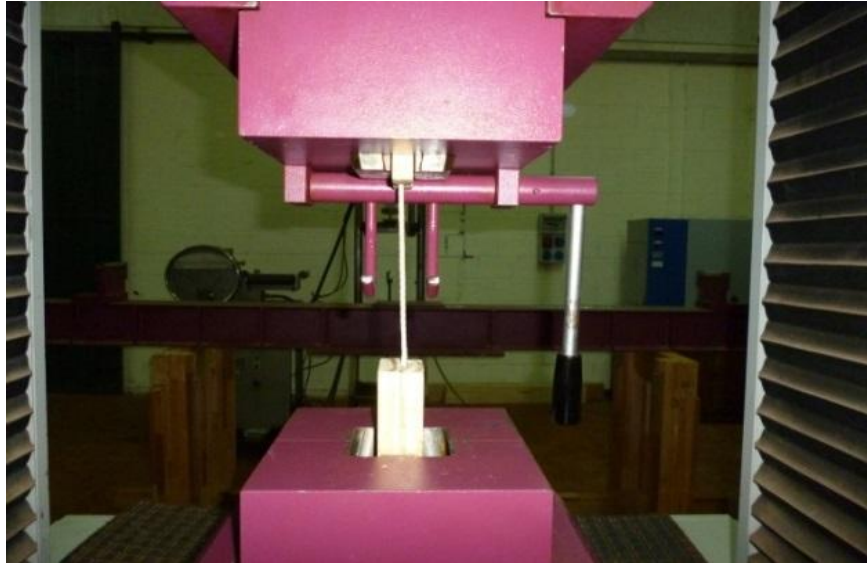


Foto 10: Ensayo de tracción que determina la carga de adherencia del cordón a la madera

3.2.2 Preparación de muestras

En la segunda etapa se construyeron treinta vigas, seis muestras por cada tratamiento:

- 6 vigas sin cordón
- 6 vigas con un cordón y 20 kg de pretensión
- 6 vigas con un cordón y 40 kg de pretensión
- 6 vigas con dos cordones y 20 kg de pretensión
- 6 vigas con dos cordones y 40 kg de pretensión

La cantidad “6” está relacionada con la capacidad que tiene la prensa con la cual se arman las vigas que tiene una longitud de 12 m. La pretensión se aplicó a los cordones cuando se armaron las vigas y previo al prensado. Esta pretensión permaneció aplicada hasta el fraguado del adhesivo. Las probetas que se utilizaron para los ensayos de las treinta vigas tienen las siguientes dimensiones (Figura 13):

A = 16 a 28 mm (Altura de las láminas)

Cantidad de láminas = 5 a 6

b = 55 mm (espesor o base de las vigas)

h = 100 mm (Altura de la sección de las vigas luego del cepillado final)

L = 2000 mm (Longitud de las vigas)

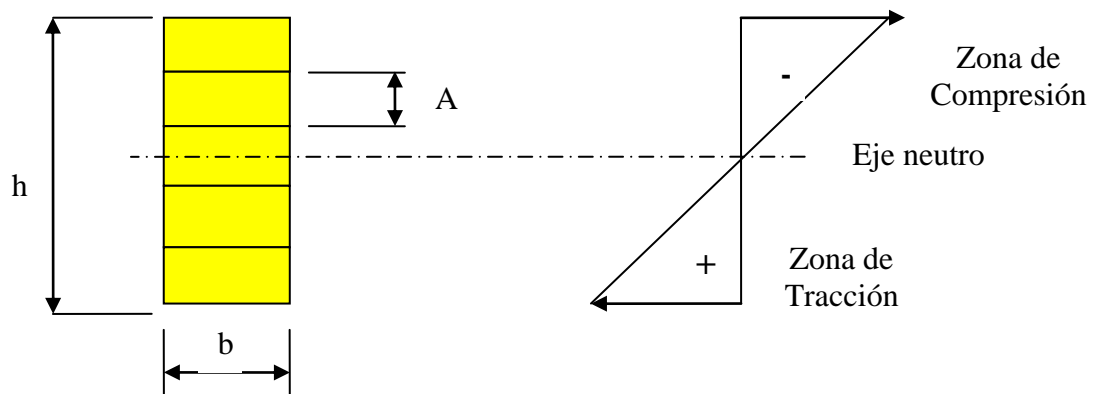


Figura 13: Esquema de la sección de vigas y diagrama de tensiones durante la flexión. Fuente: Ensayos Industriales (adaptado) (18)

Las primeras seis muestras se armaron sin cordón. Estas seis vigas fueron las testigos, siendo los resultados de los ensayos realizados sobre ellas los que se utilizarán para contrastar con los resultados de los otros cuatro tratamientos (Figura 14).

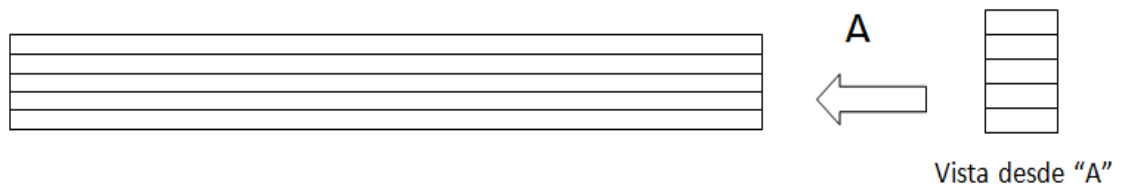


Figura 14: Viga sin cordón

Previamente al armado de las vigas que llevan cordones se hicieron las ranuras en cuatro láminas de 12 m de longitud, en dos de ellas se hizo una ranura en el centro y en las otras dos se hicieron dos ranuras (Foto 11), que luego del fraguado todas se cortan a dos metros de longitud. En las láminas que llevan dos cordones, los centros de las dos ranuras longitudinales paralelas (Figura 15 a y b), se ubicaron a una distancia $C = 15$ mm desde los bordes. Las dimensiones de la ranuras tuvieron un ancho $F = 3,5$ mm y una profundidad $E = 3,5$ mm.

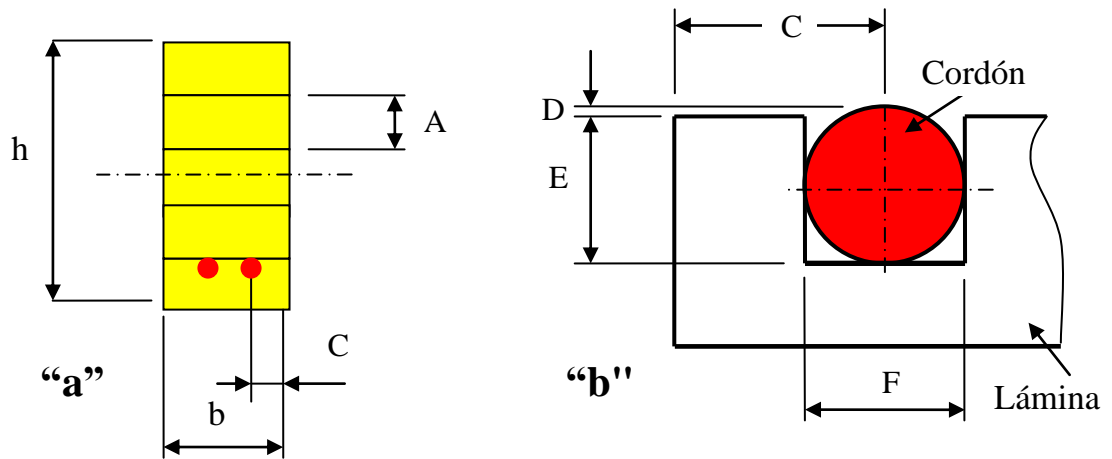


Figura 15: Esquema “a” de la sección de vigas, “b” lámina con los cordones incorporados

Con esta profundidad se logró que los cordones sobresalgan una distancia $D = 0,5 \text{ mm}$, lo que permitió que durante el prensado de las vigas, los cordones se aplasten y adopten la forma de la ranura.



Foto 11: Ranuras de alojamiento de los cordones.

Posteriormente se armaron las seis vigas de un cordón para el ensayo con una pretensión de 20 kg, luego las seis vigas de dos cordones para pretensión de 20 kg, luego las seis vigas de un cordón para pretensión de 40 kg y finalmente las seis vigas de dos cordones para pretensión de 40 kg (Figuras 16 y 17). Las

probetas con dos cordones se armaron con la misma metodología que las que se armaron con un solo cordón.

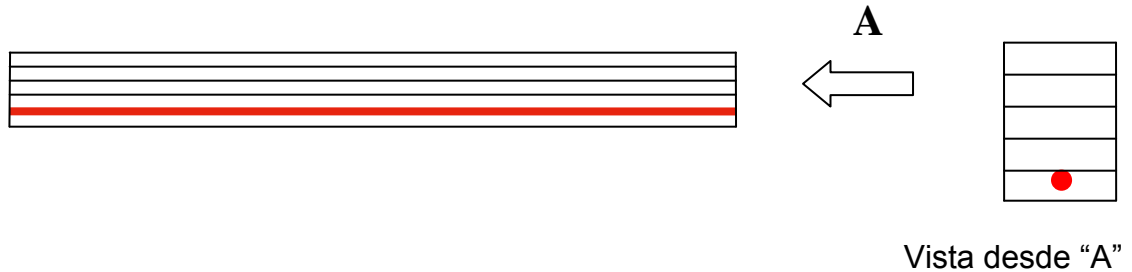


Figura 16: Viga con un cordón

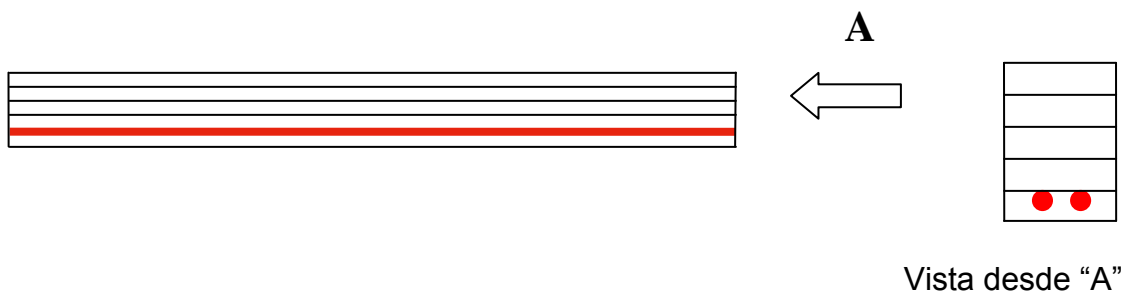
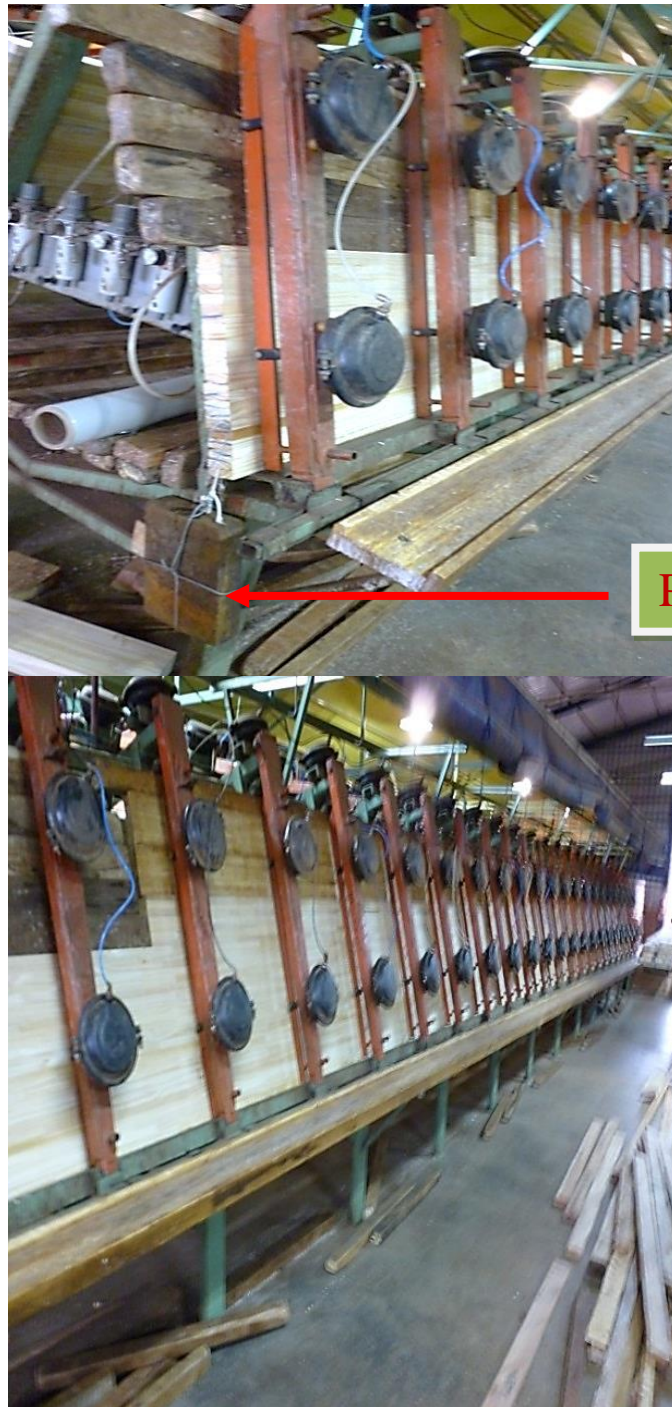


Figura 17: Viga con dos cordones

Los cordones fueron previamente impregnados con el mismo adhesivo que se utilizó para unir las láminas, luego se instalaron en las ranuras, fijando uno de sus extremos externamente a las vigas y aplicando en el otro extremo la pretensión correspondiente a cada tratamiento con la ayuda de una pesa. Las vigas se prensaron inmediatamente y se dejaron fraguar. La pretensión permaneció hasta finalizar el tiempo de fraguado del adhesivo (Foto 12). Posteriormente se quitaron las pesas a los cordones y se desmontaron las vigas de la prensa. A continuación se realizó el ajuste de la altura "h" dejándola en 100 mm. Esto se logró con el cepillado de las caras superior e inferior de tal manera que las láminas que alojan los cordones tengan aproximadamente el mismo espesor en todas las vigas.



Fotos 12: Prensa para el armado de las vigas.

Esta fue la manera de asegurar que todos los cordones quedarán ubicados a la misma distancia, medida desde el eje neutro, lo que aseguró que todos los cordones estuvieran soportando tensiones similares.

Antes de realizar los ensayos de flexión, las vigas se estacionaron durante siete días, según lo indicado en la norma (6) (Foto 13).



Foto 13: Sección transversal de vigas con un cordón y con dos cordones

3.3 Ensayos de las propiedades mecánicas

3.3.1 Flexión estática

Los ensayos (Foto 14) fueron realizados de acuerdo a la siguiente secuencia:



Fotos 14: Ensayo típico de flexión estática de una viga

1. Se apoyaron las probetas de tal manera que sus extremos fueran capaces de acompañar libremente los efectos de la deflexión sin que se originara roce u otra sollicitación ajena a la flexión (Figura 18).

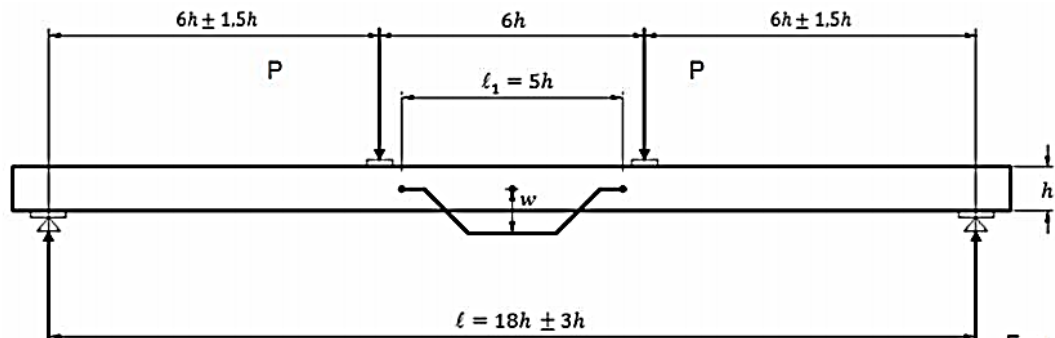


Figura 18: Esquema del ensayo de flexión estática para determinación de MOR y MOE. Fuente: Norma IRAM 9663 (7)

2. Se instalaron las probetas de modo que las cargas P fueran aplicadas según la distribución indicada en la figura 18 y tal como se indicó en la Figura 5, a una distancia $a = 6h \pm 1,5h$, siendo en este caso $h = 100$ mm, por lo tanto $a = 6.100 \pm 1,5.100 = 600 \pm 150$ mm, medida que corresponde a la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo en mm.
3. Se aplicó la carga en forma continua con una velocidad de ensayo de $8,4$ mm/min = $0,14$ mm/seg, no debiendo superar la velocidad $0,003.h = 0,003.100 = 0,3$ mm/seg (7).
4. Se midieron las deflexiones f_1 y f_2 (Foto 15), producidas en la mitad de la luz por las cargas progresivas P , a intervalos convenientemente elegidos, de modo que las lecturas que se obtuvieron se tabularon (Anexo 1). Estos datos se utilizaron en los cálculos para la determinación de E_{mI} y E_{mG} .
5. Las mediciones de los comparadores se tomaron hasta que la carga P alcanzó el 40% de la carga de rotura, que previamente se determinó ensayando una viga testigo por cada tratamiento. La finalidad de no pasar el 40% de la carga de rotura es para que las mediciones sean realizadas dentro del campo elástico, lo que garantiza la proporcionalidad de carga-deformación (Figura 19).
6. Se anotaron las cargas P máximas que provocaron la rotura de cada probeta (Anexo 2).



Foto 15: Determinación de f_1 y f_2 utilizando comparadores con apreciación de 0,01 mm

La figura 19 muestra las diferentes zonas que identifican lo que ocurre en el material de la probeta a medida que se va deformando como consecuencia del incremento de la carga.

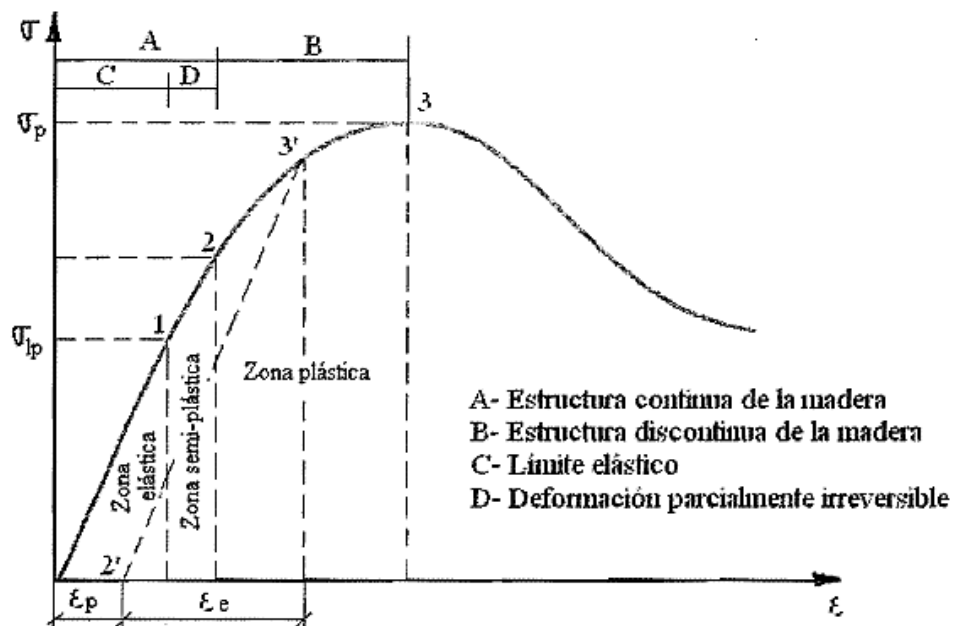


Figura 19: Diagrama tensión deformación obtenido de un ensayo de flexión estática. Fuente: Fundamento de las Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera (36)

3.3.2 Módulo de elasticidad a la flexión estática MOE

Los correspondientes pares de valores, carga y deformación en período elástico, necesarios para calcular el MOE, fueron registrados y tabulados para cada ensayo (Anexo 1). Las deformaciones en período elástico fueron medidas en la parte inferior del centro del vano respecto de los apoyos para el cálculo del MOE global, y sobre el eje neutro respecto de puntos ubicados simétricamente y separados 5h para el MOE local (Figura 16), para lo cual se utilizó el dispositivo que se instaló en la viga antes del ensayo. Para este fin se utilizaron comparadores marca Mitutoyo, con una apreciación igual a 0,01 mm (Foto 14). Esto fue realizado de igual manera para cada viga ensayada. Luego se realizaron los cálculos que dieron los valores del módulo de elasticidad global, que es el que particularmente nos interesó para obtener el MOE.

En la Tabla 2 se muestran, como ejemplo, los valores obtenidos correspondientes al tratamiento VT. Los demás resultados se encuentran en el Anexo 1.

Tabla 2: valores de P, f_1 y f_2 leídos en los comparadores para la viga testigo V2 correspondiente al tratamiento VT

Carga P kN	Deformación global f_1 mm	Deformación local f_2 mm
0,44	0,66	0,10
0,86	2,12	0,24
1,32	3,66	0,40
1,79	5,10	0,54
2,18	6,41	0,68
2,68	8,00	0,83
3,07	9,25	0,95
3,35	10,13	1,04

El MOE local (E_{ml}) y el MOE global (E_{mg}), se calculan de acuerdo con las formulas [1] y [2] vistas en el punto 2.5. Tal como lo expresado al final del punto

2.5, se utilizan solamente los valores obtenidos del MOE global para definir el Módulo de Elasticidad a la flexión estática, que se tabularon para cada ensayo en el Anexo 2.

Los valores P , f_1 y f_2 (Anexo 1) de cada ensayo fueron relevados cada 10 segundos desde el inicio del ensayo de flexión (Foto 14) y hasta que la carga aplicada adquirió un valor equivalente al 40% de la carga de rotura, habiendo sido obtenido previamente con un ensayo testigo. Los valores que se tomaron en la recta de regresión para el cálculo son aquellos con un coeficiente de correlación fue de 0,99 o mejor según lo indicado en la norma IRAM 9663.

Tal lo indicado en el punto 1.9 que se utilizaron solamente los valores obtenidos del MOE global para definir el MOE a la flexión estática de cada ensayo.

3.3.3 Módulo de rotura a la flexión estática MOR

Representa la tensión que se alcanza en la madera en el momento de la rotura. Se calculó de acuerdo con la formula [3] vista en el punto 2.6 y se tabularon (Anexo 2):

3.4 Equipos de laboratorio

3.4.1 Flexión estática y tracción de cordones

Para los ensayos de flexión estática y tracción del cordón para la prueba de adherencia, las probetas fueron llevadas al Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales de Eldorado, donde se utilizó la Máquina Electromecánica Universal, Modelo 10407030 de procedencia italiana, fabricante Didacta, con una capacidad de 300 kN (Foto 16). El ensayo de tracción del cordón fue factible de realizarlo intercambiando los dispositivos del equipo con los que se sujeta la probeta, formando parte de los accesorios correspondientes para cada tipo de ensayo.



Foto 16: Máquina Electromecánica Universal, con una capacidad de 300 kN

3.5 Diseño experimental

3.5.1 Estudio del comportamiento del cordón.

Con los valores obtenidos en los ensayos exploratorios de tracción del cordón, se hicieron los cálculos estadísticos (37) de media, desvío estándar y coeficiente de variación correspondientes a las cargas de rotura de la unión cordón–madera por pérdida de adherencia (Tabla 3).

Tabla 3: Carga de rotura de la unión cordón-madera por pérdida de adherencia, cordón-lámina, en probetas de 200 mm de longitud.

Probeta	Fuerza (N)
1	2961,00
2	2902,00
3	3067,00
4	2486,00
5	2500,00
6	2500,00

3.5.2 Estudio comparativo de las vigas.

Para los ensayos de vigas se realizó un análisis comparativo, tomando los resultados de cada ensayo, correspondiente a cada uno de los cinco tratamientos (Tabla 4) y se calcularon los valores de: media, desvío estándar y coeficiente de variación (37). Las combinaciones de tratamientos realizadas fueron (Tabla 4):

Tabla 4: Experiencias a realizar

Tratamiento	N° de probetas por cada tratamiento
VT	6 vigas sin cordón
V1C20	6 vigas con un cordón y 20 kg de pretensión
V1C40	6 vigas con un cordón y 40 kg de pretensión
V2C20	6 vigas con dos cordones y 20 kg de pretensión
V2C40	6 vigas con dos cordones y 40 kg de pretensión

Donde: VT= Vigas Testigo; V1C20= Vigas con un cordón y 20 kg de pretensión; V1C40= Vigas con un cordón y 40 kg de pretensión; V2C20= Vigas con dos cordones y 20 kg de pretensión; V2C40= Vigas con dos cordones y 40 kg de pretensión.

La humedad de la madera de las vigas, se midió durante los ensayos obteniéndose un valor promedio del 11%.

3.5.3 Diseño Factorial a dos niveles.

Con los resultados obtenidos en los ensayos, del módulo de rotura, del módulo de elasticidad y la carga de rotura a la flexión, se utilizó un diseño factorial a 2 niveles de las variables (38) (39), tomando como variables independientes dos factores: el número de cordones y la pretensión. El número de experiencias se realizó con cuatro combinaciones de tratamientos: V1C20; V1C40; V2C20 y V2C40 y seis repeticiones, dando un total de 24 experiencias (Tabla 5). Este diseño permitió conocer la significancia de los efectos principales y las interacciones de las variables sobre los resultados.

Tabla 5: Experiencias realizadas en el Diseño Factorial a dos niveles

Experiencias	N° Cordones	Pretensión kg
1	1	20
2	1	20
3	1	20
4	1	20
5	1	20
6	1	20
7	1	40
8	1	40
9	1	40
10	1	40
11	1	40
12	1	40
13	2	20
14	2	20
15	2	20
16	2	20
17	2	20
18	2	20
19	2	40
20	2	40
21	2	40
22	2	40
23	2	40
24	2	40

Las variables independientes y sus niveles de estudio fueron las siguientes:

- Número de Cordones: 1 y 2

- Pretensión (kg): 20 y 40

Las variables dependientes establecidas fueron las siguientes: MOR; MOE;

$P_{\text{máx.}}$

4- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Prueba de adherencia de los cordones

Los resultados de la carga aplicada, obtenidos en el ensayo de tracción (Tabla 3), se dividieron por 200 mm, que es la longitud de las probetas. Estos nuevos valores representaron la fuerza específica, o sea la carga por unidad de longitud, que son indicadores de la fuerza de adherencia de los cordones a la madera. Se procesaron estadísticamente (38) esos valores para encontrar el valor medio, desviación estándar y el coeficiente de variación (Figura 20).

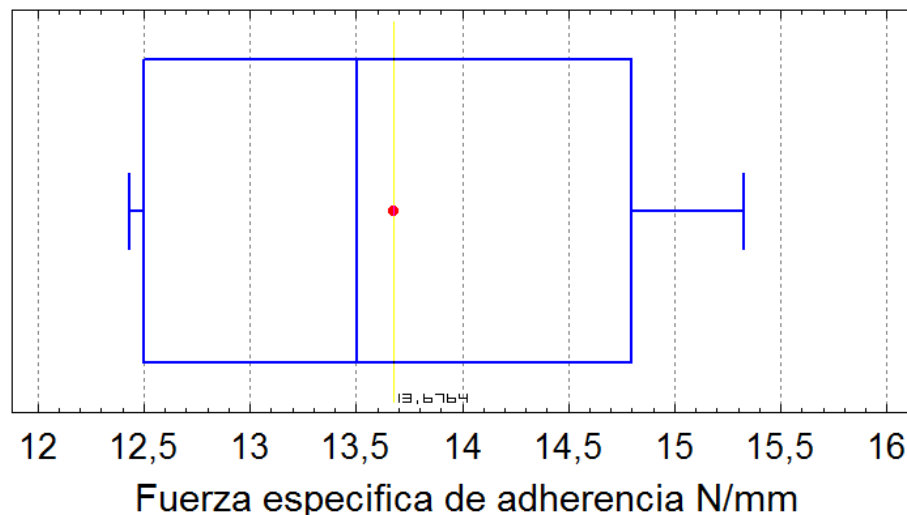


Figura 20: Media de la fuerza de adherencia específica

Se observa (Tabla 6) que el valor medio de la fuerza específica de adherencia fue de 13,7 N/mm.

Tabla 6: Resumen estadístico de la fuerza específica de adherencia

Promedio N/mm	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo N/mm	Máximo N/mm
13,7	0,13	0,10	12,4	15,3

El cordón, por especificación, tiene una carga de rotura: $P_r = 1060$ kg, que equivale a 10600 N y siendo 4 mm su diámetro, la sección tiene un valor:

$$S_c = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 4^2 / 4 = 12,56 \text{ mm}^2$$

La tensión de rotura es:

$$\sigma_r = P_r / S_c = 10600 / 12,56 = 843,95 \text{ N/mm}^2$$

Este valor, que corresponde a un cordón, es 21,6 veces mayor que el valor máximo de la tensión de rotura de las vigas ensayadas, que corresponde a 39 N/mm² (Tabla 7). Es evidente que cuando se utilizan dos cordones su resistencia se duplica. Esto indica que la resistencia del cordón está asegurada en el rango de pretensión utilizada en los diferentes tratamientos. Este ensayo tuvo como único propósito explorar el comportamiento del cordón con el adhesivo y tener una noción del nivel de carga de adherencia por unidad de longitud.

4.2 Módulo de rotura a flexión estática

Los valores de la carga máxima de flexión estática obtenidos del ensayo de cada viga se utilizaron para calcular los valores de MOR. El análisis de varianza de los valores medios del módulo de rotura a la flexión, indicó que existieron diferencias significativas, al 95% de nivel de confianza, entre las vigas testigo y las vigas con cordones y pretensión. Los intervalos están basados en el procedimiento LSD de Fisher. Puesto que el valor $P=0,0016 < 0,05$, demuestra que la incorporación de los cordones tienen un efecto significativo sobre el módulo de rotura a la flexión. En la Figura 21 se puede ver la comparación de los valores medios entre tratamientos.

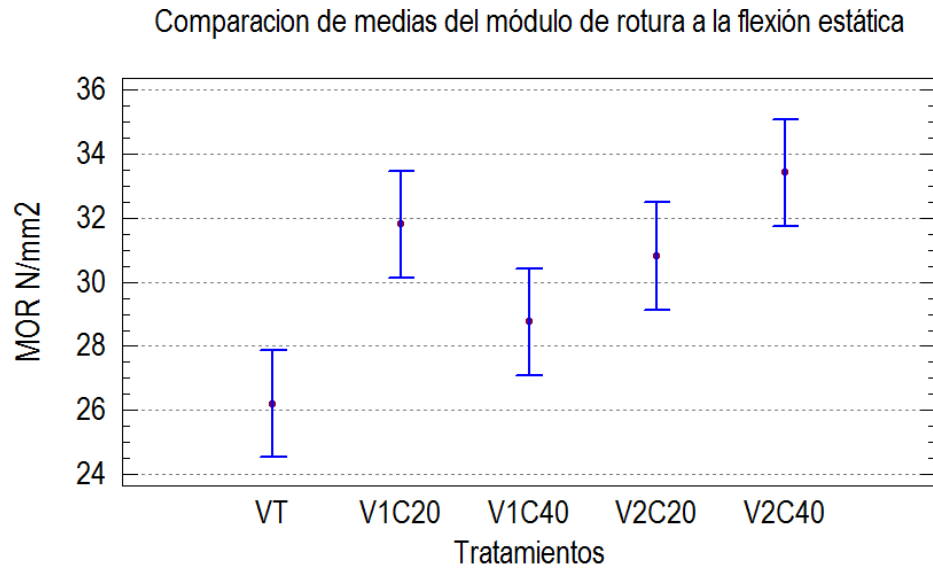


Figura 21: Comparación de medias del módulo de rotura a la flexión estática

En la Tabla 7 se presentan los resultados de los valores medios obtenidos del módulo de rotura a la flexión estática correspondiente a cada tratamiento:

Tabla 7: Resumen estadístico MOR

Tratamiento	Promedio N/mm ²	Variación % Respecto a VT	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo N/mm ²	Máximo N/mm ²
VT	26,21		1,26	4,82%	24,81	27,66
V1C20	31,81	21,36%	3,11	9,79%	27,30	36,25
V1C40	28,76	9,74%	3,87	13,45%	24,40	35,91
V2C20	30,81	17,56%	1,08	3,50%	29,50	32,25
V2C40	33,42	27,50%	3,46	10,37%	29,20	39,00

Se observa en la Tabla 7, que el máximo valor del módulo de resistencia a la flexión se da con el tratamiento V2C40, y le siguen V1C20, V2C20 y V1C40 en ese orden.

Se observa en la Figura 22 que la interacción del N° Cordones utilizados y la Pretensión aplicada, tiene una influencia significativa en el módulo de resistencia a la flexión estática, siendo la combinación V2C40 y V1C20 las que tienen mayor significación.

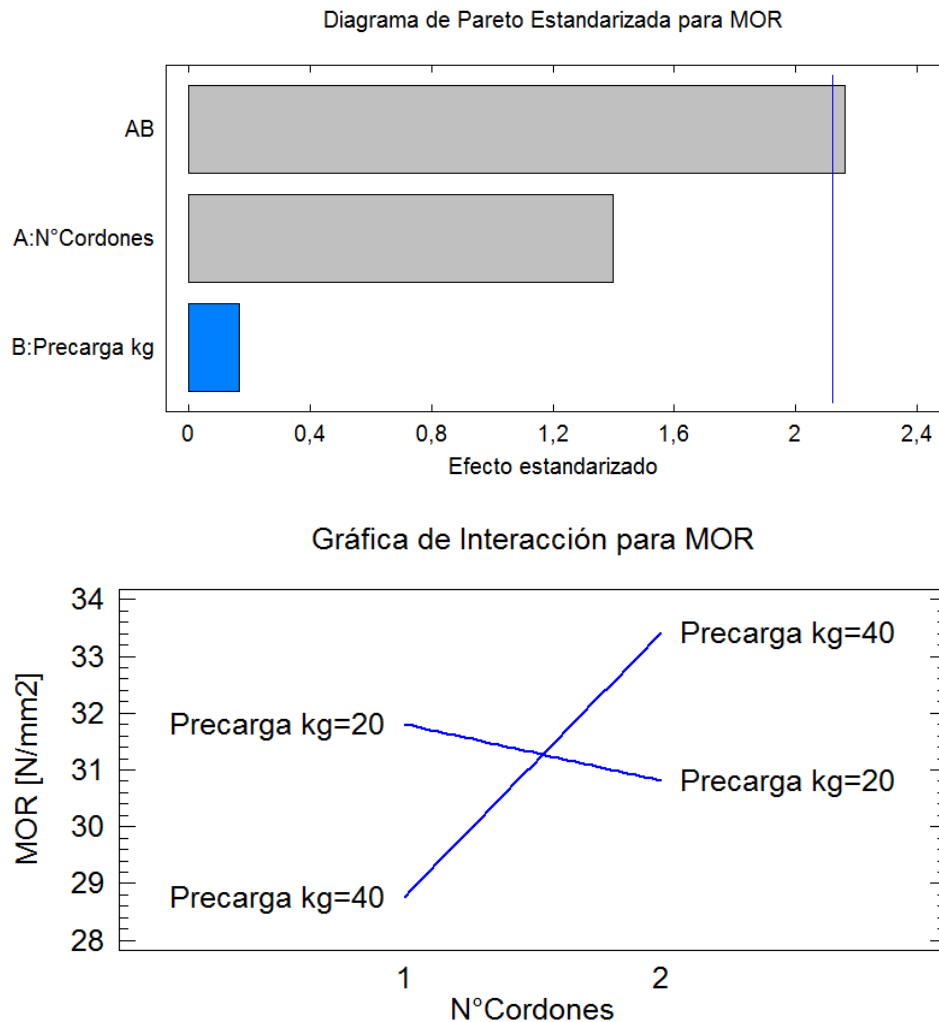


Figura 22: Efecto de las variables sobre el MOR a la flexión estática.

En el rango de valores utilizados de Pretensión y de N° Cordones, en forma individual como efectos principales, no se observa que tengan una influencia significativa en el módulo de rotura a la flexión estática.

4.3 Módulo de elasticidad a la flexión estática

Los datos leídos en los comparadores (Anexo 1) se utilizaron para encontrar la ecuación de la recta de regresión (Figura 23), que asegure un coeficiente de

correlación de 0,99, según lo indicado por la norma (7). A continuación se muestra como ejemplo la ecuación correspondiente al tratamiento VT.

$$\text{Carga} = 0,212851 + 0,308564 * \text{Deformación}$$

Tomando dos valores P_1 y P_2 de carga, comprendidos en el tramo $0,2 P_{\max}$ y $0,3 P_{\max}$ indicados por la norma, se utilizó la ecuación de la recta de regresión para calcular los valores correspondientes a la deformación W_1 y W_2 . Con los valores de P_1 , P_2 , W_1 y W_2 se calculó $E_{m.g}$. Esto se repitió para cada una de las seis vigas correspondientes a cada tratamiento y se determinaron los valores medios de cada tratamiento (Figura 24).

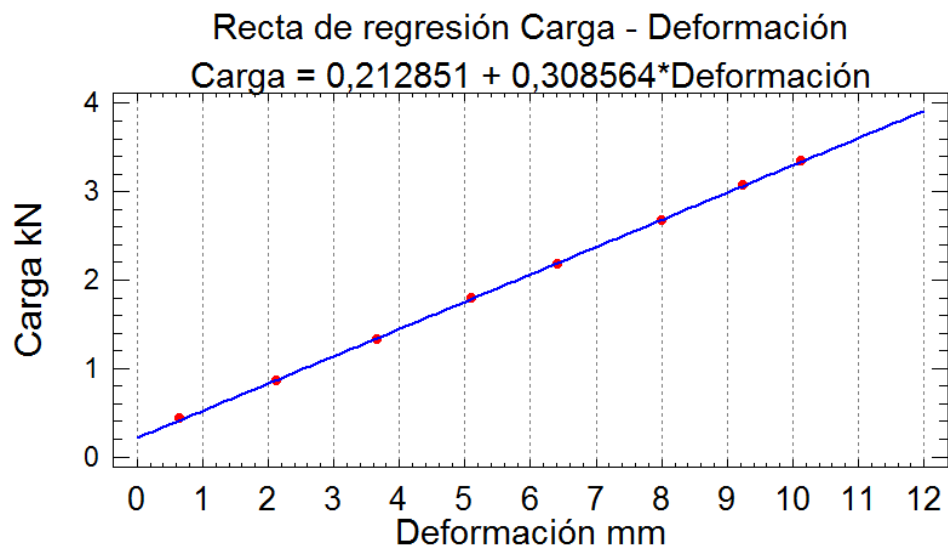


Figura 23: Recta típica de regresión para la determinación de los valores P_1 , P_2 , w_1 y w_2 con un coeficiente de correlación de 0,99991 siendo $R^2 = 99,9823 \%$

En la Tabla 8 se muestra el análisis de varianza de los valores medios del módulo de elasticidad, indica que existieron diferencias significativas, al 95% de nivel de confianza, entre las vigas testigo y las vigas con cordones y pretensión. Los intervalos están basados en el procedimiento LSD de Fisher. Puesto que el valor $P=0,0035 < 0,05$, demuestra que la incorporación de los cordones tienen un efecto significativo sobre el módulo de elasticidad. En la Figura 24 se puede ver la comparación de los valores medios entre tratamientos.

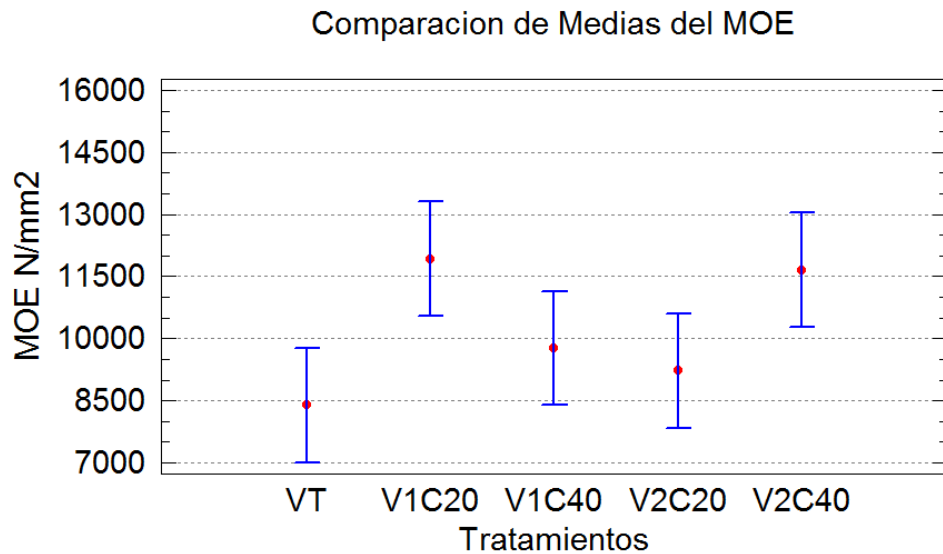


Figura 24: Comparación de medias de módulo de elasticidad a la flexión.

En la Tabla 8 se presentan los resultados de los valores medios obtenidos del módulo de elasticidad a la flexión correspondiente a cada tratamiento:

Tabla 8: Resumen estadístico del MOE

Tratamiento	Promedio N/mm ²	Variación % Respecto a VT	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo N/mm ²	Máximo N/mm ²
VT	8.393,26		1.281,08	15,26%	6.722,80	9.655,70
V1C20	11.920,10	42,02%	1.520,90	12,76%	9.765,10	14.054,40
V1C40	9.767,77	16,38%	1.052,10	10,77%	8.562,60	10.885,10
V2C20	9.225,54	9,92%	501,03	5,43%	8.423,40	9.810,10
V2C40	11.654,10	38,85%	2.308,20	19,81%	10.187,30	15.703,40

Se observa en la Tabla 8, que los máximos valores del módulo de elasticidad a la flexión se dan con los tratamientos V1C20 y V2C40 y en menor grado de significancia le siguen los tratamientos V1C40 y V2C20 en ese orden.

Se observa en la Figura 25 que la interacción, del N° Cordones utilizados y la Pretensión aplicada, tienen una influencia significativa en el módulo de

elasticidad a la flexión estática, siendo la combinación V1C20 y V2C40 las que tienen mayor significación.

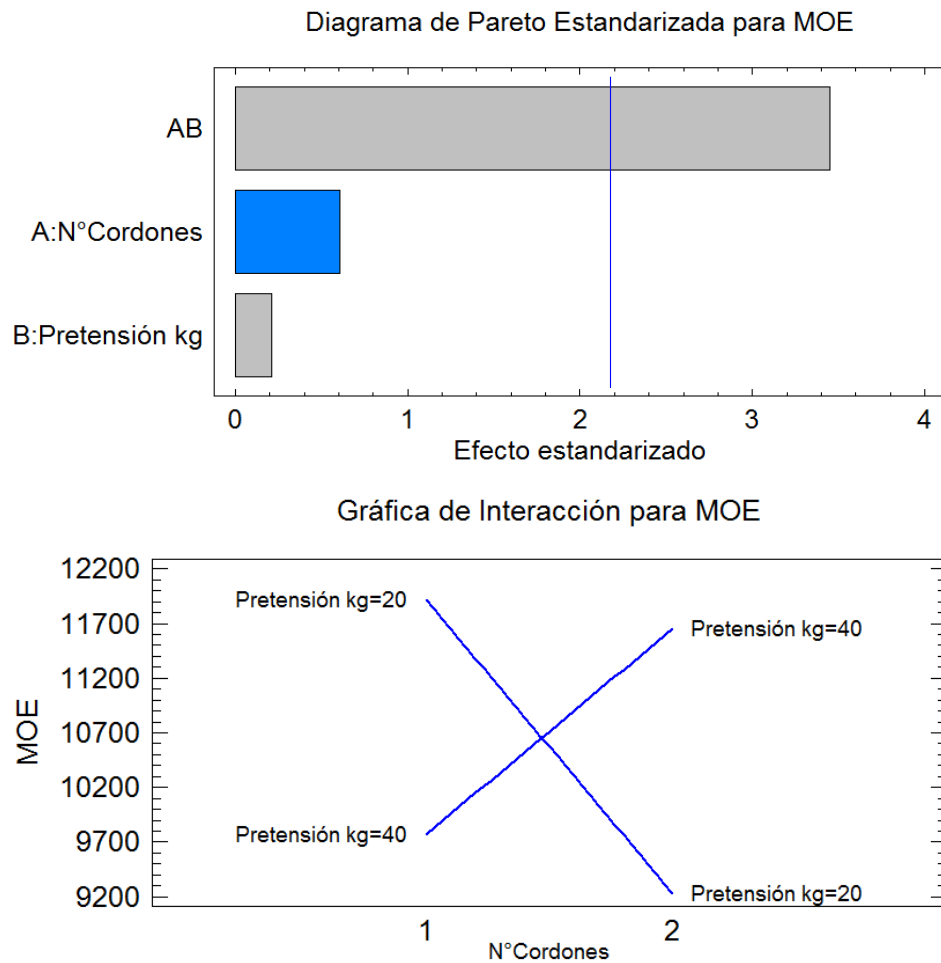


Figura 25: Efecto de las variables sobre el MOE a la flexión estática.

En el rango de valores utilizados de Pretensión y de Nº Cordones, en forma individual como efectos principales, no se observa que tengan una influencia significativa en el módulo de elasticidad a la flexión.

4.4 Carga de rotura

El análisis de varianza de los valores medios de la carga de rotura, indica que existieron diferencias significativas, al 95% de nivel de confianza, entre las vigas testigo y las vigas con cordones y pretensión. Los intervalos están

basados en el procedimiento LSD de Fisher. Puesto que el valor $P=0,0016 < 0,05$, demuestra que la incorporación de los cordones tienen un efecto significativo en los valores de la carga de rotura.

En la Figura 26 se puede ver la comparación de los valores medios entre tratamientos.

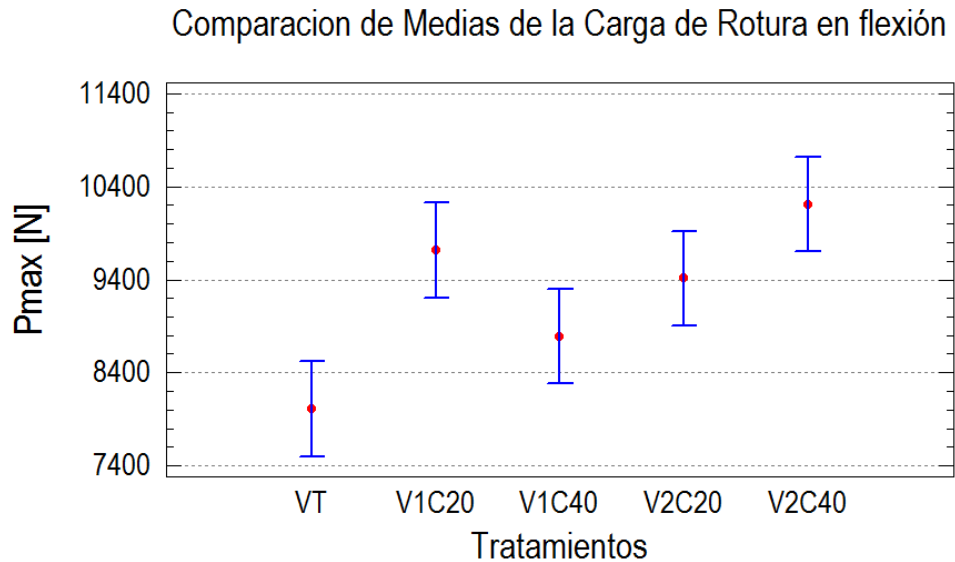


Figura 26: Comparación de medias de la carga de rotura en la flexión.

En la Tabla 9 se presentan los resultados de los valores medios obtenidos de la carga de rotura a la flexión correspondiente a cada tratamiento:

Tabla 9: Resumen Estadístico P_{max}

Tratamiento	Promedio N	Variación % Respecto a VT	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo N	Máximo N
VT	8.008,10		386,34	4,82%	7.580,83	8.451,67
V1C20	9.718,70	21,36%	951,10	9,79%	8.341,67	11.076,40
V1C40	8.788,29	9,74%	1.181,64	13,45%	7.455,56	10.972,50
V2C20	9.414,17	17,56%	329,78	3,50%	9.013,89	9.854,17
V2C40	10.210,60	27,50%	1.058,38	10,37%	8.922,22	11.916,70

Se observa en la Tabla 9, que los máximos valores de la carga de rotura a la flexión se dan con los tratamientos V2C40 y V1C20. En menor grado de significancia le siguen los tratamientos V2C20 y V1C40 en ese orden.

Se observa en la Figura 27, que la interacción del N° Cordones utilizados y la Pretensión aplicada, tiene una influencia significativa en la carga de rotura a la flexión estática, siendo la combinación V2C40 y V1C20 las que tienen mayor significación.

En el rango de valores utilizados de Pretensión y de N° Cordones, en forma individual como efectos principales, no se observa que tengan una influencia significativa en la carga de rotura a la flexión.

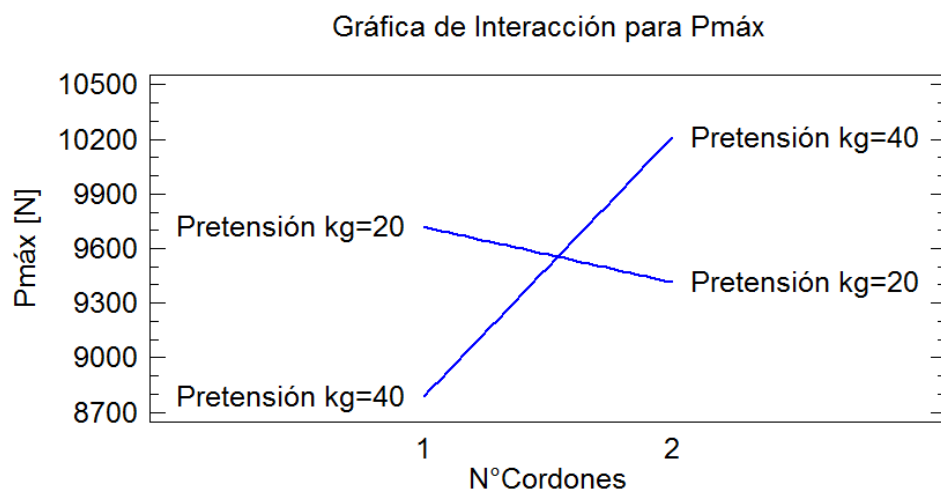
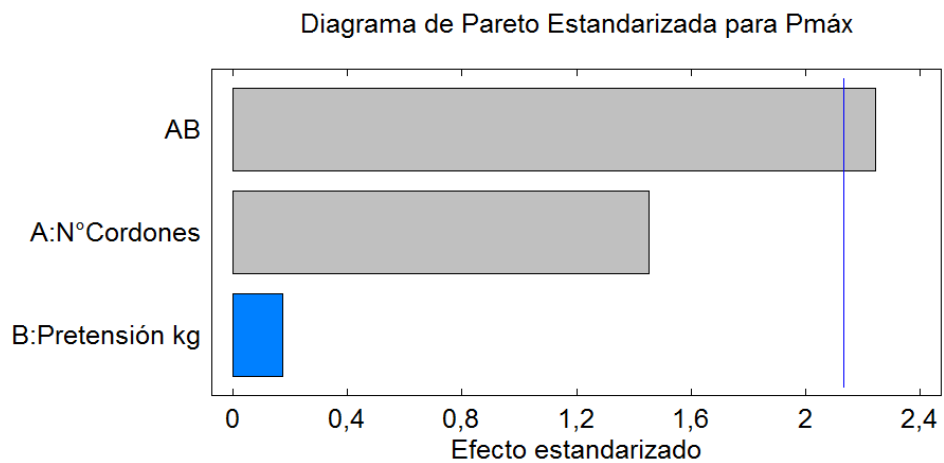


Figura 27: Efecto de las variables sobre P_{máx}. a la flexión estática.

4.5 Resumen comparativo de las propiedades mecánicas

Los resultados de los valores promedios de las propiedades mecánicas, obtenidos en los ensayos, correspondientes a cada tratamiento, se presentan en la Tabla 10:

Tabla 10: Comparación del MOR, MOE y P_{max}.

Tratamiento	MOR N/mm ²	MOE N/mm ²	P _{max} N
VT	26,21	8.393,26	8.008,10
V1C20	31,81	11.920,10	9.718,70
V1C40	28,76	9.767,77	8.788,29
V2C20	30,81	9.225,54	9.414,17
V2C40	33,42	11.654,10	10.210,60

Las variaciones porcentuales, de los resultados de los valores medios de las propiedades mecánicas, obtenidos en los ensayos correspondientes a cada tratamiento con cordón con relación al tratamiento sin cordón, se expresan en la Tabla 11. Se muestra también una mejora en la relación Peso/Resistencia. Se utilizó la expresión:

$$\text{Comparación (Peso/Resistencia, \%)} = ((1/A - 1/B)/(1/B)) * 100$$

Dónde: A = MOR correspondiente a los tratamientos distintos a VT

B = MOR correspondiente al tratamiento VT

Tabla 11: Comparación % de MOR, MOE y P_{max} con relación al tratamiento VT y mejora de la relación Peso/Resistencia

Tratamiento	MOR (%)	MOE (%)	P _{max} (%)	Peso/Res (%)
V1C20	21,36%	42,02%	21,36%	-17,60%
V1C40	9,74%	16,38%	9,74%	-8,88%
V2C20	17,56%	9,92%	17,56%	-14,94%
V2C40	27,50%	38,85%	27,50%	-21,57%

Se observa en la Tabla 11 lo siguiente: El máximo incremento porcentual del módulo de resistencia a la flexión, con relación al tratamiento VT, se da con el

tratamiento V2C40, y le siguen V1C20, V2C20 y V1C40 en ese orden. El máximo incremento porcentual del módulo de elasticidad a la flexión, con relación al tratamiento VT, se da con el tratamiento V1C20, y le siguen V2C40, V1C40 y V2C20 en ese orden. El máximo incremento porcentual de la carga de rotura a la flexión, con relación al tratamiento VT, se da con el tratamiento V2C40, y le siguen V1C20, V2C20 y V1C40 en ese orden. Como todas las vigas tienen un peso similar, el mejor valor de reducción en la relación porcentual Peso/Resistencia se da con el tratamiento V2C40, y le siguen V1C20, V2C20 y V1C40 en ese orden.

4.6 Comparación de los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas con la Norma IRAM y la Norma Europea.

El análisis de los resultados presentados en la Tabla 10 consistió en realizar una comparación entre las vigas utilizadas como testigos, que en la actualidad se fabrican para comercializar y las vigas reforzadas con cordones, las cuales fueron fabricadas con maderas de las mismas especies y densidades similares, utilizando el mismo proceso tal como fue expresado anteriormente. Resulta de interés comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo, con otros resultados indicados por las normas de nuestro país y con otros indicados por las normas a nivel internacional. En la Tabla 12 se realizó esta comparación de los valores obtenidos con ensayos de flexión similares indicados en las normas IRAM 9060-1 (2006) (5) y las clases resistentes más habituales en el mercado indicados por la norma europea UNE-EN 1194 (40), adoptadas por todos los fabricantes europeos de vigas laminadas de madera (41).

Se puede observar que con la incorporación de los cordones mejoraron los valores de resistencia y rigidez, logrando elevarlos. Comparando los valores del MOR y MOE con los indicados por las normas, con la incorporación de los cordones se logra pasar de una clase de resistencia a otra, como por ejemplo: El tratamiento VT no califica para la clase de resistencia GL24 porque el MOE es menor que el exigido por la norma, pero sí califican los tratamientos V1C20 y V2C40, porque los valores del MOR y MOE son superiores a los exigidos por la norma.

Tabla 12: Comparación del MOR, MOE y Densidad

Comparación	Clase de Resistencia	Especies	MOR N/mm ²	MOE N/mm ²	Densidad Kg/mm ³
VT	–	<i>Pinus taeda/elliottii</i>	26,21	8.393,26	515,87
V1C20	–	<i>Pinus taeda/elliottii</i>	31,81	11.920,10	553,55
V1C40	–	<i>Pinus taeda/elliottii</i>	28,76	9.767,77	517,41
V2C20	–	<i>Pinus taeda/elliottii</i>	30,81	9.225,54	518,51
V2C40	–	<i>Pinus taeda/elliottii</i>	33,42	11.654,10	556,00
IRAM	1	<i>Pinus taeda/elliottii</i>	20	12.500	420,00
IRAM	2	<i>Pinus taeda/elliottii</i>	13	7.500	390,00
UNE-EN 1194	GL24	Coníferas	24	11.600	380,00
UNE-EN 1194	GL28	Coníferas	28	12.600	410,00
UNE-EN 1194	GL32	Coníferas	32	13.700	430,00

En cuanto a los valores del MOR, todos los tratamientos de vigas con cordones superan el MOR de la clase de resistencia GL28 y particularmente el valor del MOR del tratamiento V2C40 supera el MOR de la clase de resistencia GL32, lo que no sucede en ninguno de estos casos con el tratamiento VT. En cuanto a los valores del MOE, con la incorporación de los cordones, superan a la clase de resistencia GL24 y aproxima los valores a los indicados por las clases de resistencia GL28 y GL32, pero no llegan a igualarlos o superarlos. Se estima que esto se debe a que el control de calidad con que se llevan adelante las etapas de armado de las vigas no se ajusta a las indicaciones de las normas correspondientes. Esto será ampliado seguidamente en Recomendaciones.

5- CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones parciales

5.1.1 Comportamiento del cordón

Los ensayos de adherencia de los cordones a la madera, demostraron la capacidad de absorber carga del cordón sin dar evidencias de deterioro por causa del adhesivo. En ninguno de los ensayos que se realizaron con las vigas, se evidenció pérdida de adherencia del cordón, situación que se visualiza cuando el cordón se introduce en los extremos de la viga dentro de la ranura y que se puede observar durante la deflexión de la viga.

5.1.2 Estudio comparativo de las vigas

La comparación de los valores promedios obtenidos del módulo de rotura, del módulo de elasticidad y de la carga de rotura a la flexión estática, entre las vigas testigo sin cordones y las vigas con la incorporación de los cordones, dieron un incremento significativo.

- La mayor ganancia del módulo de rotura a la flexión estática se obtuvo con los tratamientos V2C40, V1C20 y V2C20, con valores de 27,50%, 21,36% y 17,56% respectivamente. A continuación le sigue el tratamiento V1C40 con un valor de 9,74%.
- La mayor ganancia del módulo de elasticidad a la flexión estática se obtuvo con los tratamientos V1C20 y V2C40, con valores muy próximos de 42,02% y 38,85% respectivamente. A continuación le siguen los tratamientos V1C40 y V2C20, con valores de 16,38% y 9,92% respectivamente.
- Los incrementos de la carga de rotura a la flexión estática se obtuvieron con los tratamientos V2C40, V1C20 y V2C20, con valores de 27,50%, 21,36% y 17,56% respectivamente. A continuación le sigue el tratamiento V1C40 con un valor de 9,74%..

5.1.3 Diseño factorial a dos niveles

- El efecto de la interacción de las variables: N° Cordones y Pretensión, afectaron en forma significativa al módulo de rotura a la flexión estática, siendo la combinación V2C40 y V1C20 las que tuvieron mayor significación.
- El efecto de la interacción de las variables: N° Cordones y Pretensión, afectaron en forma significativa al módulo de elasticidad a la flexión estática, siendo la combinación V1C20 y V2C40 las que tienen mayor significación.
- El efecto de la interacción de las variables: N° Cordones y Pretensión, afectan en forma significativa al valor de la carga de rotura a flexión estática, siendo la combinación V2C40 y V1C20 las que tuvieron mayor significación.

5.2 Conclusión general

En el rango utilizado de las variables Pretensión y N° Cordones, se obtuvieron los máximos valores del módulo de rotura a la flexión estática con los tratamientos V2C40 y V1C20 en ese orden, del módulo de elasticidad a la flexión estática con los tratamientos V1C20 y V2C40 en ese orden y de la carga de rotura a flexión estática $P_{m\acute{a}x}$ con los tratamientos V2C40 y V1C20 en ese orden.

Se obtuvo comparativamente una menor relación porcentual peso/resistencia con los tratamientos V2C40, V1C20, V2C20 y V1C40 del -21,57%, -17,60%, -14,94% y -8,88% respectivamente, con respecto al tratamiento VT.

5.3 Profundización del trabajo

Podría contemplar:

1. Modificar la herramienta que realiza la ranura, para obtener una profundidad uniforme y un perfil circular en el fondo de la misma, en reemplazo del actual perfil rectangular, lo que permitirá una mejor adaptación del cordón e incrementar la adherencia, particularmente al eliminar las esquinas, considerando que el cordón tiene una sección circular.

2. Realizar más experiencias, con otros valores de pretensión, lo que permitirá obtener niveles intermedios y así utilizar, por ejemplo, un Diseño Central Compuesto, para lograr mayor precisión de la influencia de los factores en la variación de la respuesta y encontrar la mayor significancia de los efectos principales y su interacción sobre la respuesta. De esta manera se podría definir cuál sería el valor de pretensión, que para el tipo de cordón y diámetro utilizado, se obtengan los mejores resultados de las propiedades mecánicas.
3. Realizar más experiencias con diferentes espesores de vigas utilizando un número mayor de cordones para encontrar una correlación entre “espesor de viga – número de cordones” que den los máximos valores de MOR, MOE a la flexión estática.
4. Ensayar con otros diámetros de cordones, por ejemplo 5 y 6 mm.

5.4 Recomendaciones

Durante la ejecución de los ensayos y el posterior análisis de los resultados de cada tratamiento, se observó que los valores resultantes, de algunas probetas, presentaban diferencias importantes respecto a los valores medios en un mismo tratamiento. Esto pudo deberse a la falta de control de calidad en el proceso del armado de las vigas. Fundamentalmente hay tres controles que se deben considerar y mínimamente deben ser implementados en la fabricación de las láminas extremas, que son aquellas que están sometidas a los máximos esfuerzos de tracción y compresión. Estos controles son:

- a- Selección de la madera con corte tangencial y sin médula.
- b- Fijar un valor mínimo de la densidad de la madera.
- c- Controlar la calidad del dentado y del ensamble con adhesivo del *finger joint*.

Si bien algunos de estos factores están escritos en las normas, se observó que no se cumplen en la práctica, pudiendo ser éste uno de los motivos de la variación significativa de los resultados de algunas probetas respecto de los

valores medios del correspondiente tratamiento. Además se estima que esta falta de control de calidad, conduce a que no se logren valores de rigidez mayores, como lo reflejan los valores del MOE cuando se comparan con los indicados por las normas.

6- BIBLIOGRAFIA

1. RITIM - Red de Instituciones de Desarrollo Tecnológico de la Industria Maderera; "Proyecto Vigas Laminadas" 1 Ed. (2003).
2. IRAM 9660-1; "Madera laminada encolada estructural – Parte 1: Clases de resistencia y requisitos de fabricación y control" 1 Ed. 26 p (2006).
3. IRAM 9660-2; "Madera laminada encolada estructural – Parte 2: Métodos de ensayo" 1 Ed. 14 p (2006).
4. IRAM 9661; "Madera laminada encolada estructural – Requisitos de los empalmes por unión dentada" 1 Ed. 18 p (2006).
5. IRAM 9662-3; "Madera laminada encolada estructural – Clasificación visual de las tablas por resistencia – Parte 3: Tablas de pino *Taeda* y *elliottii* (*Pinus Taeda* y *elliottii*)" 1 Ed. 15 p (2006).
6. IRAM 45055; "Adhesivos para estructuras de madera – Adhesivos de policondensación de tipos fenólicos, aminoplásticos y de otros tipos – Clasificación y requisitos de comportamiento" 2 Ed. 15 p (2006).
7. IRAM 9663 "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de propiedades físicas y mecánicas" Ed. 19 p (2013).
8. Reglamento CIRSOC 601. "Reglamento Argentino de Estructuras de Madera". Ed. 124 p (2013).
9. Brady J.F., Harte A.M. "Prestressed FRP Flexural Strengthening of Softwood Glue - Laminated Timber Beams" Department of Civil Engineering, National University of Ireland, Galway (NUIG) Galway, Ireland.
http://www.ewpa.com/archive/2008/june/paper_125.pdf.
(Consulta: 17 Septiembre 2014).
10. Vyhmeister Winkler C. A. "Control de Deformaciones en Vigas de Madera Laminada Mediante Cables de Acero de Baja Relajación Postensados" Tesis de Grado. Universidad Austral de Chile (2011).
11. Coronel E. "Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Primera parte: Fundamentos de las propiedades mecánicas de la madera". Instituto de Tecnología de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales. Santiago del Estero. Argentina. pp 13 -105(1995).

12. Karsulovic C., J. T. y A. G. Cisternas. "Predicción del módulo de ruptura en madera estructural de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) mediante razones de resistencia y de área nudosa". Revista de Ciencias Forestales 7(1-2):47-57 (1991).
13. Forest Products Laboratory. "Wood Handbook - Wood as an Engineering Material". United States Department of Agriculture. Forest Service. Report FPL-GTR-190. Madison Wisconsin (April 2010).
14. El Mueble y la Madera. Arquitectura "La Madera Laminada: Una Alternativa Estructural y Ambiental" Revista Edición N°70, pp 10-16 (2010).
15. Gleid de Ruibal, Mónica; Kolln, Rubén. "Estudio de la densidad básica según diferentes espaciamientos en *Pinus Taeda*" L. Jornadas sobre Pinos Subtropicales. Actas. Tomo II. CIEF. Eldorado, Misiones. Argentina. Pp.85-88 (1992).
16. Pezzutti R.; Caldato S. "Crecimiento de plantaciones de *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* var *elliottii* x *Pinus caribaea* var *hondurensis* de 13 años de edad bajo diferentes modalidades del control de maleza". Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Puerto Iguazú, Misiones. (2013).
17. Weber E.M. "Caracterización Física y Mecánica de *Pinus taeda* Origen Marion en Plantas de Diferentes Edades y Determinación de Usos Potenciales, Misiones, Argentina" Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Misiones (2005).
18. Breyer, D.E.; Fridley, K.J.; Cobein K.E.; Pollock, jr.D.G. "Design of Wood Structures-ASD/LRFD" 6ª Ed. pp 5.1 – 5.22 (2007).
19. Timoshenko S. "Resistencia de Materiales" Primera Parte. Editorial Espasa Calpe S.A. pp 34-90 (1950).
20. González Arias A.; Palazón A.C.A. "Ensayos Industriales" 6 Ed. pp 133-145; 280-288 (1967).
21. Feodosiev V.I. "Resistencia de Materiales" 1 Ed. Editorial MIR pp 127-178 (1976).
22. Pisarenko G.S.; Yakovlev A.P.; Matveev V.V. "Manual de Resistencia de Materiales" Editorial MIR (1979).
23. Pfeil, Walter; "Estructuras de Madera" 2 Ed. LTC Editora S.A. (1994).
24. Scardiglia A. "Estabilidad de las construcciones II – Resistencia de Materiales" Universidad Nacional de Córdoba (1974).

25. Dubbel H. “Manual del Constructor de Máquinas” T1. Editorial Labor S.A. pp 450 – 510 (1975).
26. Química Tháí S.L. “La Madera, Propiedades” Valencia, España. <https://quimicathai.wordpress.com/2010/03/29/la-madera-propiedades/> (Consulta: 24 Agosto 2014).
27. Rothamel P.; Zamorano E. “Maderas – Cálculo y Dimensionado de Estructuras Portantes” 1ª Ed. Librería de La Paz. pp 5 – 26 (2006).
28. Hermoso Prieto E. “Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L.”. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid (2001).
29. Piter J. C., Zerbino R. L., Blaß H. J. “Relación entre el Módulo de Elasticidad global y el local en vigas de *Eucalyptus grandis* de Argentina”. Maderas, Ciencia y Tecnología. vol.5 no.2 Concepción 2003. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718221X2003000200002&lng=es&nrm=iso&tlng=en (Consulta 8 de Agosto 2014).
30. Madrid M. “Tecnología de la Adhesión” Departamento Técnico de Loctite España. 59 p. https://www.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf (Consulta 22 septiembre 2014).
31. Quevedo Machuca V.M. “Adherencia y Adhesivos para Madera” Materiales de Nueva Generación y Materiales Eficientes. Universidad de Alcalá. [https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PD-MA-ASIG/PD-ASIG-200637/TAB42359/ADHERENCIA%20Y%20ADHESIVOS%20PARA%20MADERA%20\(V%20Quevedo\).pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PD-MA-ASIG/PD-ASIG-200637/TAB42359/ADHERENCIA%20Y%20ADHESIVOS%20PARA%20MADERA%20(V%20Quevedo).pdf) (consulta 22 septiembre 2014).
32. Mattos, Jorge; “Manufactura de Vigas” 1 Ed. Universidad Nacional de Misiones. Módulo Producción de Vigas Laminadas. pp 1-14 (1997).
33. AITIM – Asociación de Investigación Técnica de la Industria de la Madera. “Adhesivos para estructuras de madera laminada” Revista N° 179 (2012).
34. Dirección General de Armamento y Material – Subdirección General de Tecnología y Centros. “Fibras de Polietileno” Boletín N°6. España. pp 14. Primer Trimestre. (2005). <http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/Lists/Publicaciones/Attachments/177/BoletinN6.pdf>. (Consulta 27 septiembre 2014).

35. Manas Chanda; Salil K. Roy. "Industrial Polymers, Specialty Polymers, and Their Applications" CRC Press Taylor & Francis Group. pp 1-8 (2009).
36. Coronel E. "Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Segunda parte: Fundamentos de las propiedades mecánicas de la madera". Instituto de Tecnología de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales. Santiago del Estero. Argentina. pp 215-238 (1995).
37. Area, M.C. , Schmalko, M.E., "Estadística Básica" Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales, UNAM. (1996).
38. Area, M.C. Material de apoyo del curso "Metodología de la Investigación. Diseños Experimentales" Universidad Nacional de Misiones, UNAM (2012).
39. Montgomery, D. "Diseño y Análisis de Experimentos para Ingeniería" 2^a Ed. Editorial Iberoamericana. México (1991).
40. Comité Europeo de Normalización (1999).UNE-EN 1194 "Estructuras de madera-Madera laminada encolada-Clases resistentes y determinación de los valores característicos. En: Estructuras de madera, Editado por AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación-(2001), Madrid.
41. Schickhofer G. "Productos de Madera para la Construcción" Escuela Técnica Universitaria de Graz, Austria Centro de Técnica de la Construcción Instituto de la Construcción en Acero, en Madera y Estructuras Laminadas. pp 1-24. proHolz Austria (2009).

ANEXO 1

**TABLAS CON LOS VALORES OBTENIDOS DE LOS
COMPARADORES PARA CADA ENSAYO**

Viga V2 – Tratamiento VT			Viga V3 – Tratamiento VT		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)	Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,44	0,66	0,10	0,41	0,90	0,01
0,86	2,12	0,24	0,97	2,58	0,15
1,32	3,66	0,40	1,46	4,00	0,28
1,79	5,10	0,54	2,01	5,36	0,41
2,18	6,41	0,68	2,46	6,42	0,51
2,68	8,00	0,83	3,01	7,96	0,66
3,07	9,25	0,95	3,39	8,93	0,74
3,35	10,13	1,04			

f₁ = global; f₂ = local

Viga V4 – Tratamiento VT			Viga V5 – Tratamiento VT		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)	Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,51	1,40	0,11	0,30	0,82	0,03
1,06	2,67	0,25	0,81	2,25	0,14
1,65	4,15	0,39	1,25	3,51	0,24
2,22	5,60	0,52	1,76	4,79	0,34
2,73	6,94	0,64	2,31	6,10	0,44
3,31	8,30	0,77	2,78	7,51	0,55
			3,28	8,85	0,65

f₁ = global; f₂ = local

Viga V6 – Tratamiento VT		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,31	0,80	0,04
0,85	2,00	0,14
1,43	3,41	0,26
1,99	4,72	0,37
2,61	6,17	0,48
3,15	7,50	0,59

f₁ = global; f₂ = local

Viga V2 – Tratamiento V1C20			Viga V3 – Tratamiento V1C20		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)	Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,52	1,34	0,07	0,53	1,18	0,04
1,07	2,60	0,18	1,22	2,48	0,15
1,72	4,20	0,33	1,89	3,83	0,27
2,29	5,36	0,46	2,58	5,14	0,39
2,86	6,76	0,60	3,32	6,60	0,54
3,45	8,00	0,78			

f₁ = global; f₂ = local

Viga V4 – Tratamiento V1C20			Viga V5 – Tratamiento V1C20		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)	Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,54	1,27	0,03	0,55	1,00	0,06
1,12	2,55	0,21	1,27	2,50	0,10
1,68	3,90	0,44	1,89	4,00	0,21
2,32	5,38	0,71	2,56	5,25	0,35
2,98	6,46	0,92	3,23	6,55	0,47
3,58	8,78	1,01	3,82	7,42	0,62

f₁ = global; f₂ = local

Viga V6 – Tratamiento V1C20		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,65	1,00	0,06
1,43	2,55	0,14
2,20	3,77	0,23
3,09	5,20	0,44
3,83	6,43	0,61

f₁ = global; f₂ = local

Viga V2 – Tratamiento V1C40			Viga V3 – Tratamiento V1C40		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)	Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,53	1,15	0,06	0,51	0,78	0,09
1,15	2,40	0,13	1,08	2,00	0,21
1,84	3,85	0,26	1,66	3,64	0,35
2,46	5,15	0,37	2,20	5,00	0,48
3,20	6,60	0,47	2,77	6,45	0,64
3,83	7,68	0,58	3,24	7,70	0,77
			3,77	8,85	0,90

f₁ = global; f₂ = local

Viga V4 – Tratamiento V1C40			Viga V5 – Tratamiento V1C40		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)	Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,57	1,38	0,06	0,62	1,58	0,06
1,19	2,85	0,15	1,02	2,44	0,10
1,78	4,05	0,24	1,59	4,65	0,15
2,35	5,42	0,34	2,24	5,07	0,23
2,97	6,82	0,45	2,83	6,35	0,30
3,53	8,12	0,56	3,45	7,72	0,40

f₁ = global; f₂ = local

Viga V6 – Tratamiento V1C40		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,35	0,82	0,13
0,83	2,00	0,23
1,36	3,38	0,34
1,90	4,75	0,46
2,41	5,07	0,58
2,92	7,44	0,70
3,53	8,89	0,83

f₁ = global; f₂ = local

Viga V2 – Tratamiento V2C20			Viga V3 – Tratamiento V2C20		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)	Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,55	1,44	0,12	0,52	1,24	0,06
1,04	2,80	0,22	1,06	2,52	0,16
1,53	4,12	0,33	1,57	3,83	0,26
2,06	5,50	0,46	2,13	5,12	0,36
2,53	6,76	0,58	2,73	6,57	0,46
2,99	8,10	0,70	3,29	7,81	0,55
3,56	9,47	0,84	3,72	9,00	0,66

f₁ = global; f₂ = local

Viga V4 – Tratamiento V2C20			Viga V5 – Tratamiento V2C20		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)	Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,57	1,46	0,07	0,37	0,92	0,04
0,97	2,81	0,16	0,95	2,44	0,13
1,52	4,04	0,24	1,42	3,54	0,23
2,12	5,32	0,45	1,97	4,91	0,40
2,63	6,38	0,56	2,50	6,13	0,53
3,15	7,54	0,68	3,05	7,53	0,63
3,64	8,94	0,78	3,63	8,82	0,75

f₁ = global; f₂ = local

Viga V6 – Tratamiento V2C20		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,48	1,32	0,00
1,05	2,98	0,00
1,41	4,08	0,08
1,87	5,43	0,21
2,33	6,67	0,34
2,85	8,22	0,48
3,32	9,55	0,61
3,78	10,90	0,75

f₁ = global; f₂ = local

Viga V2 – Tratamiento V2C40			Viga V3 – Tratamiento V2C40		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)	Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,36	0,90	0,00	0,43	1,26	0,00
1,03	2,30	0,06	1,06	2,60	0,00
1,65	3,58	0,13	1,63	4,05	0,00
2,32	5,00	0,23	2,23	5,38	0,02
2,94	6,28	0,33	2,82	6,78	0,15
3,63	7,74	0,44	3,42	7,18	0,29

f₁ = global; f₂ = local

Viga V4 – Tratamiento V2C40			Viga V5 – Tratamiento V2C40		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)	Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,54	1,30	0,07	0,52	1,24	0,04
1,09	2,60	0,18	1,23	2,80	0,17
1,72	4,90	0,31	1,84	4,14	0,30
2,34	5,30	0,45	2,44	4,48	0,42
2,93	6,64	0,61	3,06	6,80	0,54
3,57	7,96	0,84	3,72	8,28	0,68

f₁ = global; f₂ = local

Viga V6 – Tratamiento V2C40		
Carga (KN)	f ₁ (mm)	f ₂ (mm)
0,47	1,10	0,04
1,02	2,24	0,12
1,61	3,42	0,20
2,27	4,92	0,32
2,95	6,18	0,42
3,56	7,53	0,53

f₁ = global; f₂ = local

ANEXO 2

**TABLAS CON LOS VALORES OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS
PARA CADA TRATAMIENTO**

VT - Vigas Testigo			
Probetas	P_{max} N	MOR N/mm²	MOE N/mm²
V1	8.341,67	27,3	-
V2	7.580,83	24,81	6.722,80
V3	7.672,50	25,11	9.586,60
V4	8.451,67	27,66	7.527,30
V5	8.268,33	27,06	9.655,70
V6	7.733,61	25,31	8.473,88
Promedio	8.008,10	26,21	8.393,26

V1C20 – Vigas con un cordón y 20 kg de pretensión			
Probetas	P_{max} N	MOR N/mm²	MOE N/mm²
V1	8.341,67	27,3	-
V2	11.076,39	36,25	11.894,20
V3	9.591,39	31,39	9.765,10
V4	9.640,28	31,55	12.103,90
V5	10.437,78	34,16	14.054,40
V6	9.224,72	30,19	11.782,77
Promedio	9.718,70	31,81	11.920,07

V1C40 - Vigas con un cordón y 40 kg de pretensión			
Probetas	P_{max} N	MOR N/mm²	MOE N/mm²
V1	8.903,89	29,14	-
V2	10.972,50	35,91	10.769,80
V3	8.231,67	26,94	8.920,20
V4	8.699,17	28,47	9.701,20
V5	8.466,94	27,71	8.562,60
V6	7.455,56	24,4	10.885,06
Promedio	8.788,29	28,76	9.767,77

V2C20 - Vigas con dos cordones y 20 kg de pretensión			
Probetas	P_{max} N	MOR N/mm²	MOE N/mm²
V1	9.625,00	31,5	-
V2	9.013,89	29,5	8.423,40
V3	9.854,17	32,25	9.344,20
V4	9.444,72	30,91	9.274,90
V5	9.502,78	31,1	9.810,10
V6	9.044,44	29,6	9.275,10
Promedio	9.414,17	30,81	9.225,54

V2C40 - Vigas con dos cordones y 40 kg de pretensión			
Probetas	P_{max} N	MOR N/mm²	MOE N/mm²
V1	9.594,44	31,4	-
V2	8.922,22	29,2	10.654,80
V3	10.602,78	34,7	10.187,30
V4	11.916,67	39	15.703,40
V5	10.602,78	34,7	10.357,10
V6	9.625,00	31,5	11.367,72
Promedio	10.210,65	33,42	11.654,06