



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Caracterización de la Madera Laminada Encolada de *Eucalyptus grandis* Uruguayo

Ricardo Cerviño Leis

Karen García Cocozzelli

Cecilia Volpe Baridón

Programa de grado en Ingeniería Civil
Instituto de Estructuras y Transporte
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Agosto de 2017



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Caracterización de la Madera Laminada Encolada de *Eucalyptus grandis* Uruguayo

Ricardo Cerviño Leis

Karen García Cocozzelli

Cecilia Volpe Baridón

Tesina presentada para la aprobación de la asignatura Proyecto de Investigación e Innovación en Ingeniería Estructural de la Carrera Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

Tutor:

Prof. Dra. Ing. Vanesa Baño

Cotutor:

Dr. Ing. Abel Vega

Referente externo:

PhD. Arq. Laura Moya

Montevideo – Uruguay

Agosto de 2017

Cerviño, Ricardo; García, Karen; Volpe, Cecilia.

Caracterización de la Madera Laminada
Encolada de *Eucalyptus grandis* Uruguayo
Montevideo: Universidad de la Republica,
Facultad de Ingeniería, 2017.

Tutor: Prof. Dra. Ing. Vanesa Baño

Cotutor: Dr. Ing. Abel Vega

Referente externo: PhD. Arq. Laura Moya

Tesina de grado - Universidad de la Republica.
Facultad de Ingeniería, Instituto de Estructuras y
Transporte, Programa de grado, Ingeniería Civil,
2017.

Palabras Clave: *Eucalyptus grandis*, madera
laminada encolada, caracterización estructural,
clases resistentes.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESINA

Prof. MSc. Arq. Daniel Godoy

Prof. MSc. Ing. Sebastián Dieste Ballestrino

Prof. Dr. Ing Jorge Pérez Zerpa

Montevideo – Uruguay

Agosto de 2017

Agradecimientos

Queremos agradecer a todas aquellas personas que han sido parte del proceso que culmina con la entrega de esta tesina de investigación.

En primer lugar damos las gracias a aquellos que han estado directamente involucrados en este trabajo y, sin cuya ayuda, nunca habría salido a la luz.

Agradecemos muy especialmente a nuestra tutora Vanesa Baño que nos acercó al terreno de la ingeniería en madera y fue nuestra principal guía y referente durante el proceso.

A Abel Vega que nos acompañó estando aquí en Uruguay y luego, aún en la distancia, siempre estuvo presente.

A Laura Moya que nos instruyó durante el proceso de elaboración de las vigas de MLE.

A Luis Segura que nos brindó su apoyo durante el proceso de cálculo compartiendo sus consejos y conocimiento con nosotros.

Además, queremos agradecer a todos aquellos que, desde un lugar u otro, nos brindaron su ayuda durante el proceso

Luego, queremos agradecer a todas aquellas personas que son parte de nuestra vida. Gracias a nuestra familia y amigos por estar allí, por animarnos cuando lo necesitamos y por creer en nosotros.

A todos ellos, nuestro más sentido agradecimiento.

RESUMEN

En la presente tesina de investigación se muestran los resultados obtenidos en el proceso de caracterización de la madera laminada encolada (MLE) de *Eucalyptus grandis* uruguayo, así como la aplicación de estos resultados al diseño y cálculo de una estructura realizada con piezas de este material.

El trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación INNOVAGRO-ANII FSA_1_2013_1_12897: “Estudio de las propiedades estructurales de vigas de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* producida en Uruguay para su asignación a clases resistentes”. El proyecto es ejecutado en forma conjunta por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, la Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT y el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), y es financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII).

En el mencionado proyecto se pretende caracterizar la madera laminada encolada producida en Uruguay para uso estructural en base a los criterios de certificación europeos (EN 14080:2013).

El proyecto consta de una primera fase experimental en la cual se realizan ensayos a flexión de vigas de madera laminada de tamaño estructural, así como también de densidad de las mismas, todos según la norma EN 408:2011.

A continuación, se tiene una segunda etapa que se centra en determinar los valores de cálculo (valores característicos) para el material ensayado a partir de los resultados experimentales (de la primera fase) y las especificaciones que aparecen en las normas EN 14080:2013, EN 14358:2016 y EN 384:2010.

La última fase del proyecto consiste en aplicar los resultados obtenidos mediante el diseño de la estructura de un puente de 15 metros de luz que se propone realizar con madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* uruguayo. El diseño estará enmarcado en las bases de cálculo brindadas por el Eurocódigo 5 y será desarrollado a modo de ante-proyecto, con memoria descriptiva y cálculo estructural.

Se busca que los resultados obtenidos a través del presente trabajo de investigación sirvan como antecedente para la elaboración del cuerpo normativo de madera estructural en Uruguay, que actualmente se encuentra en marcha.

Palabras claves:

Eucalyptus grandis, madera laminada encolada, caracterización estructural, clases resistentes.

ABSTRACT

This research thesis presents the results obtained in the process of characterization of glued laminated timber (Glulam) of the Uruguayan *Eucalyptus grandis*, as well as the application of these results to the design and calculation of a structure made with pieces of this material.

This work is part of the research project INNOVAGRO-ANII FSA_1_2013_1_12897: "Study of the structural properties of glued laminated beams made of *Eucalyptus grandis* produced in Uruguay for their assignment to resistant classes". The project is carried out jointly by the School of Engineering of the Universidad de la República, the School of Architecture of the Universidad ORT and the Uruguayan Technological Laboratory (LATU), and is funded by the National Agency for Research and Innovation (ANII).

This project aims to characterize glued laminated timber produced in Uruguay for structural use according to European standards (EN 14080:2013).

This work implies a first experimental phase in which, according to EN 408:2011, bending and density tests of structural sized Glulam beams are carried out.

Then, there is a second stage which is focused on determining the calculation values (characteristic values) for the material tested in terms of the experimental results (of the first phase) and specifications given in standards EN 14080:2013, EN 14358:2016 and EN 384:2010.

The final phase of this project is based upon the application of the results obtained to the design of a 15 meters length bridge structure that is intended to be realised with Glulam beams of Uruguayan *Eucalyptus grandis*. The design will be carried out following the calculation bases provided by the Eurocode 5 and will be developed as an ante-project, with descriptive memory and structural calculation.

It is hoped that this research may serve as useful background for the Uruguayan normative provisions currently in progress regarding structural wood.

Keywords:

Eucalyptus grandis, glued laminated wood, structural characterization, resistant classes.

Lista de Figuras

Figura 3.1: Productos de ingeniería en madera. Fuente http://www.apawood.org/	17
Figura 3.2: Elementos de madera estructural y sus correspondientes normas europeas de requisitos de fabricación (EN 14080:2013).	18
Figura 3.3: hectáreas de suelo forestadas por las distintas especies hasta el año 2010 (MGAP, 2010).	20
Figura 3.4: Superficie forestada registrada en el año 2013 por especies (en ha y como porcentaje del total). (MGAP, 2016).	21
Figura 3.5: Direcciones longitudinal, transversal y radial de la madera.....	22
Figura 3.6: Relación entre tensión y deformación en compresión paralela a la fibra (Argüelles, 1996).	23
Figura 3.7: Esquema adhesión y cohesión. Fuente http://medicinaug3.blogspot.com.uy/2015/08/adhesion-y-cohesion.html	26
Figura 3.8: A la izquierda mercado agrícola de Montevideo, a la derecha termas del Dayman de Salto (Fuente: http://www.saltoalanaturaleza.com.uy/).....	28
Figura 4.1: Requisitos de fabricación y caracterización de la MLE con base en la norma EN 14080:2013.	34
Figura 4.2: Esquema de trabajo	39
Figura 4.3: Esquema del proceso productivo de la madera laminada encolada.	40
Figura 4.4: Sección del material de ensayo	41
Figura 4.5: Singularidades características tablonces de <i>Eucalyptus grandis</i> a) fisuras pasantes, b) nudo; y c) arista faltante.	43
Figura 4.6: Producción de <i>finger-joints</i>	44
Figura 4.7: Valores de referencia para <i>fingers</i> según la norma EN 14080:2013	44
Figura 4.8: Muestra de la instancia anterior y posterior a la aplicación de presión sobre la unión dentada.	45
Figura 4.9: Pre y post aplicación de presión sobre testas.	45
Figura 4.10: Cepillado de láminas.	46
Figura 4.11: Apilado de láminas respetando consideraciones técnicas.	47
Figura 4.12: Encolado de las láminas	48
Figura 4.13: Procedimiento de encolado de láminas.	48
Figura 4.14: Exceso de cola luego de pasar por dispensador de adhesivo.	49
Figura 4.15: Apilado de láminas.....	49
Figura 4.16: Máquina de prensado de vigas laminadas encoladas.	50
Figura 4.17: Apariencia de las vigas tras el prensado.....	51
Figura 4.18: Esquema general de los ensayos.	52
Figura 4.19: Xilohigrómetro RTU 600 (Gann).....	53
Figura 4.20: Banco de ensayos utilizado para ensayo a flexión de vigas.	54
Figura 4.21: LVDT utilizado para la medición del desplazamiento de las fibras en la sección media de las vigas.	54

Figura 4.22: Configuración del ensayo para la determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a flexión (EN 408:2011).....	55
Figura 4.23: Gráfico de desplazamiento (mm) en función de la fuerza (kN) aplicada....	58
Figura 4.25: Gráfico de fuerza (kN) en función del tiempo (s).	59
Figura 4.26: Valor del 5% percentil en una distribución normal.....	62
Figura 4.27: Gráfico para determinar el factor de corrección k_s según EN 384:2016. ...	66
Figura 5.1: Histograma y curva de Gauss.....	69
Figura 5.2: Gráficos de distribución empírica (según K-S) y función de distribución Gaussiana.	70
Figura 5.3: A la izquierda-arriba rotura mixta, a la derecha-arriba rotura por madera y abajo rotura por adhesivo.	72
Figura 5.4: Pérdidas en la resistencia a flexión por causa de la serie de penalizaciones que se realizan para el cálculo con MLE.	78
Figura 7.1: Prototipo del puente a diseñar. Vista en 3D, frontal y lateral.	84
Figura 7.2: Dimensiones y descargas de un camión para el proyecto de puentes (MTO, 1990).	87
Figura 7.3: Diagrama de cortante en el modelo de SAP2000 para la combinación de carga 3 (Tabla 7.1).	88
Figura 7.4: Ejes cartesianos del modelo realizado para la estructura.	89
Figura 7.5: Ejes considerados para el estudio del viento sobre la estructura.....	109
Figura 7.6: Altura equivalente considerada para obtener el empuje horizontal del viento.	111
Figura 7.7: Fuerzas consideradas para realizar las verificaciones del viento sobre la estructura.....	113
Figura 7.8: Conectores utilizados para el anclaje del puente.....	114

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Valores medios de resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad...	24
Tabla 3.2: Propiedades de adhesivo PUR. (Bakar, 2003).....	27
Tabla 3.3: Proyectos de investigación en madera estructural llevados a cabo en Uruguay por FING-ORT-LATU.....	29
Tabla 4.1: Criterios de calidad visual de tablonces de madera aserrada de <i>Eucalyptus grandis</i> para Clase 2.....	42
Tabla 4.2: Recomendaciones norma EN 14080:2013 para una buena ejecución de <i>finger-joints</i>	44
Tabla 4.3: Rangos de valores de presión según espesor de láminas. EN 14080:2013.....	50
Tabla 4.4: Parámetros de la viga ensayada.	57
Tabla 4.5: Parámetros del ensayo	57
Tabla 4.6: Valores tomados durante la realización del ensayo	57
Tabla 4.7: Coeficiente $ks(n)$ para las propiedades de resistencia según EN 14358:2016	64
Tabla 5.1: Valores individuales de las vigas ensayadas.....	68
Tabla 5.2: Parámetros utilizados para el test de Kolmogorov-Smirnov.....	71
Tabla 5.3: Valores resistentes derivados de estudios de MLE uruguayo y brasilero.	71
Tabla 5.4: Número de vigas que rompieron por adhesivo y por madera acompañados de su resistencia media correspondiente.	73
Tabla 5.5: Datos utilizados para obtener valores característicos de la población.	73
Tabla 5.6: Valores característicos de tablas de madera aserrada de <i>E. grandis</i> según resultados parciales de proyecto INNOVAGRO.	73
Tabla 5.7: Valores resistentes derivados de estudios de MLE uruguayo y argentino.	74
Tabla 5.8: Valores característicos de las muestras 1 y 2.....	75
Tabla 5.9: Valores característicos de la población de MLE <i>E. grandis</i> uruguayo.....	75
Tabla 5.10: Clases resistente de la MLE según EN 14080:2013.	76
Tabla 5.11: Clases resistentes de cada valor característico poblacional.	77
Tabla 5.12: Pérdidas en los parámetros resistentes por causa de la serie de penalizaciones que se realizan para el cálculo con MLE.	78
Tabla 5.13: Pérdidas porcentuales por asignación de una clase resistente a la población.	79
Tabla 5.14: Clases resistentes de las vigas de MLE comercializadas a nivel mundial en relación a la uruguayo.	79
Tabla 7.1: Propiedades de la MLE utilizada en el cálculo del puente.	85
Tabla 7.2: Propiedades del asfalto utilizado en el cálculo del puente.....	85
Tabla 7.3: Coeficientes de seguridad de las cargas, combinaciones de cargas.....	88
Tabla 7.4: Coeficiente reductor de la resistencia (k_{mod}).....	90
Tabla 7.5: Viguetas. Verificaciones a flexión simple para los distintos estados de carga.	91
Tabla 7.6: Viguetas. Verificaciones a cortante para los distintos estados de carga.	91

Tabla 7.7: Viguetas. Verificaciones al vuelco lateral para los distintos estados de carga.	93
Tabla 7.8: Viguetas. Fuerza de compresión para la verificación del pandeo para cada uno de los estados de carga.	94
Tabla 7.9: Viguetas. Verificaciones al pandeo según "z" para los distintos estados de carga.	94
Tabla 7.10: Viguetas. Verificaciones al pandeo según "x" para los distintos estados de carga.	95
Tabla 7.11: Viguetas. Resultados del estudio de aplastamiento en los apoyos para apoyos interiores.	96
Tabla 7.12: Viguetas. Resultados del estudio de aplastamiento en los apoyos para apoyos laterales.	96
Tabla 7.13: Vigas. Verificaciones a flexión simple para los distintos estados de carga.	97
Tabla 7.14: Vigas. Verificaciones a cortante para los distintos estados de carga.	98
Tabla 7.15: Vigas. Verificaciones al vuelco lateral para los distintos estados de carga.	99
Tabla 7.16: Vigas. Fuerza de compresión para la verificación del pandeo para cada uno de los estados de carga.	100
Tabla 7.17: Vigas. Verificaciones al pandeo según "z" para los distintos estados de carga.	101
Tabla 7.18: Vigas. Verificaciones al pandeo según "y" para los distintos estados de carga.	101
Tabla 7.19: Viguetas. Resultados del estudio de aplastamiento en los apoyos para apoyos.	102
Tabla 7.20: Fórmulas utilizadas para hallar la flecha diferida en los distintos estados de carga.	103
Tabla 7.21: Vigas. Flechas obtenidas para los distintos estados de carga.	104
Tabla 7.22: Viguetas. Flechas obtenidas para los distintos estados de carga.	104

Tabla de Contenidos

Capítulo 1: Introducción	12
Capítulo 2: Justificación y Objetivos	14
Capítulo 3: Antecedentes	16
3.1. Introducción	16
3.2. El eucalipto	19
3.2.1. Taxonomía y distribución	19
3.2.2. Origen y evolución histórica en Uruguay	20
3.2.3. Descripción de la madera de eucalipto en Uruguay	21
3.3. Adhesivos estructurales	25
3.3.1. Definición	25
3.4. Madera laminada encolada.....	27
3.4.1. Origen, evolución histórica y establecimiento como material de construcción	27
3.4.2. Madera Laminada Encolada en Uruguay y en la región	27
3.4.3. Campo de aplicación de la MLE.....	29
3.5. Cuerpo normativo	31
3.5.1. Normativa europea.....	31
3.5.2. Propuesta normativa para Uruguay	32
Capítulo 4: Materiales y Metodología.....	34
4.1. Consideraciones generales	34
4.1.1. Proceso de fabricación y caracterización de la MLE	34
4.2. Esquema general de trabajo	39
4.3. Material de ensayo	39
4.3.1. Esquema general de producción de MLE	41
4.3.2. Madera aserrada de partida	41
4.3.3. Fabricación de las vigas de MLE	44
4.4. Ensayos y obtención de datos	52
4.4.1. Esquema general de los ensayos	52
4.4.2. Equipos utilizados	53
4.4.3. Ensayos realizados y obtención de datos	55

4.5. Procesamiento de datos.....	60
4.5.1. Análisis estadístico.....	60
4.5.2. Caracterización estructural.....	61
Capítulo 5: Resultados y discusión	68
5.1. Valores obtenidos.....	68
5.1.1. Distribución de los resultados	69
5.2. Análisis de valores medios y tipo de falla.....	71
5.3. Propiedades características de la muestra	73
5.3.1. Valores de madera aserrada de <i>E. grandis</i>	73
5.3.2. Valores característicos de MLE argentina	74
5.4. Propiedades características de la población	75
5.5. Asignación de la clase resistente.....	75
5.5.1. Estudio de la magnitud de las penalizaciones realizadas para la MLE estructural.....	77
5.5.2. Maderas de MLE en el mundo.....	79
Capítulo 6: Conclusiones de la Investigación	80
Capítulo 7: Estudio de un puente a realizar con MLE de <i>E. grandis</i>	82
7.1. Memoria de cálculo.....	82
7.1.1. Introducción	82
7.1.2. Generalidades.....	82
7.1.3. Cargas	86
7.1.4. Estados de carga.....	87
7.1.5. Modelos computacionales.....	88
7.1.6. Estados límite últimos	89
7.1.7. Estados límite de servicio	102
7.1.8. Estudio del viento sobre la estructura	106
Capítulo 8: Conclusiones del Estudio de la Estructura	116
Capítulo 9: Referencias Bibliográficas	117
9.1. Textos.....	117
9.2. Normativa	120
Anexo A:	121
Deducción ecuación del Módulo de elasticidad según la teoría de viga de Timoshenko (Baño et. al, 2016).....	121

Anexo B:	124
Planos de la estructura.....	124

Capítulo 1:

Introducción

La madera es uno de los materiales estructurales más antiguos utilizado en edificaciones, la misma posee además un amplio campo de aplicación en construcciones como pueden ser puentes, residencias, iglesias e incluso aquellas edificaciones que se encuentran expuestas a agentes altamente corrosivos.

Hoy por hoy, la tendencia de uso de madera en estructuras no está asociada con el empleo de madera aserrada como tal (debido a las limitaciones que esto implica en cuanto a longitud y sección de las piezas), sino que, en lugar de ésta, se utilizan productos de ingeniería de madera (*Engineered Wood Products* -EWP- por sus siglas en inglés), encontrándose muy extendido el uso de la madera laminada encolada (MLE o *Glulam* en inglés) con fines estructurales.

Conociendo sus propiedades y características la madera es eficiente para ser utilizada en estructuras puesto que ofrece una amplia gama de beneficios. La madera es un material renovable con excelentes relaciones resistencia-peso específico y propiedades aislantes. Además, desempeña un importante papel ambiental, actuando como sumidero de CO₂. La conciencia pública sobre la sostenibilidad y su importancia en el sector de la construcción está creciendo día a día, fomentando el uso de materiales ambientalmente amigables, como es el caso de la madera (Cuadrado et.al, 2015). Por lo que, es un producto que permite obtener muy buenos rendimientos productivos y ambientales mediante una correcta gestión forestal.

A pesar de las ventajas comparativas que presenta la madera frente a otros materiales comúnmente empleados en la construcción (como son el acero o el hormigón armado), en Uruguay existe un gran prejuicio en relación al uso de la misma en estructuras principalmente por causa de: la falta de conocimiento en lo que respecta a las propiedades y comportamiento de la misma, la ausencia de proyectos específicos que puedan servir como referencia de futuros diseños así como también la cultura uruguaya de la construcción que no acostumbra a realizar edificaciones en este material.

Además de lo anterior la madera aserrada y los productos de ingeniería en madera que pueden encontrarse actualmente en Uruguay no cuentan con las especificaciones técnicas sobre su aptitud estructural, durabilidad y calidad geométrica, así como tampoco se conoce de forma certera la interacción madera-adhesivo ni el proceso de fabricación de estos productos. Por otra parte el país no

cuenta con un cuerpo normativo de cálculo de estructuras en madera que respalde el empleo de estos materiales.

Para lograr colocar la madera a la par de otros materiales constructivos que hoy en día son más utilizados, es necesario conocer su origen, propiedades, particularidades y variabilidad a la hora de su empleo como material estructural. Lo anterior se vuelve de gran importancia a la hora de seleccionar la especie de madera a utilizar, la cual dependerá de cada uso, situación y características de la estructura de la que formará parte.

Finalmente cabe mencionar que el eucalipto es en Uruguay un claro ejemplo de especie arraigada en el territorio en los últimos años y su utilidad puede ser demostrada al observar las diversas construcciones que han sido elaboradas con esta madera y permanecen en pie con sus funcionalidades de uso intactas.

A pesar de que las cuestiones mencionadas en el párrafo anterior son muy valiosas, no dejan de ser apreciaciones subjetivas e históricas y, en la actualidad, las mismas no son suficientes para satisfacer el nivel técnico y profesional que se requiere en cualquier proyecto constructivo y estructural. La verdadera puesta en valor de la madera laminada encolada de eucalipto requiere datos claros, racionales, tangibles y un conocimiento objetivo de sus propiedades, que sirvan de base y justificación de todos los procesos de la cadena de valor del producto, desde el árbol en sí mismo hasta la obtención de la madera laminada encolada como material constructivo.

Capítulo 2:

Justificación y Objetivos

El conocimiento de las propiedades de las especies de madera presentes en cada región, ya sea de forma autóctona o naturalizada, resulta esencial para que la industria pueda ampliar la lista de posibles materias primas y productos que de ellas derivan.

Dentro de los productos de ingeniería de madera disponibles en el mercado uruguayo, la madera laminada encolada de producción nacional tiene gran potencial en su utilidad en una amplia gama de estructuras, en especial aquellas en las que se debe cubrir grandes luces que soportan principalmente su peso propio, como es el caso de techos de galpones industriales o centros deportivos (Ramage et al, 2016), pudiendo llegar incluso a edificaciones como lo es el edificio de apartamentos Treet en Noruega (Abrahamsen & Malo, 2014). Cuando se habla de grandes luces, cabe destacar que con este tipo de madera se pueden lograr vigas rectas de canto constante o vigas a dos aguas de hasta 30 metros (Argüelles, 1996).

Actualmente, son varias las construcciones de pequeño y mediano porte erigidas en Uruguay con madera laminada fabricada localmente, pero que no cumplen con los requisitos mínimos para ser estructural.

El eucalipto es una especie forestal con gran importancia en el país, y tanto él como la madera laminada encolada que de él deriva, no cuentan en Uruguay con el respaldo normativo para su empleo como material estructural a pesar de tener aptitudes adecuadas a tal fin. En el país, no existe ninguna normalización que regule su calidad física y estructural, los requisitos mínimos de fabricación, las condiciones de comercialización, diseño y construcción.

La ausencia de normativa para los materiales mencionados, la falta de estudios rigurosos acerca sus propiedades mecánicas y el creciente interés en el sector que estos productos de ingeniería, en especial la madera laminada encolada, poseen en la actualidad, justifican el planteamiento del presente trabajo que se enmarca dentro del proyecto de investigación INNOVAGRO-ANII FSA_1_2013_1_12897 financiado por la ANII.

El mencionado proyecto es titulado: “Estudio de las propiedades estructurales de vigas de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* producida en Uruguay para su asignación a clases resistentes”, y es llevado a cabo por el grupo

interinstitucional constituido por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, la Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT y el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU).

Por lo dicho anteriormente, el objetivo general de este trabajo es caracterizar la madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* producida en Uruguay mediante la determinación de sus propiedades mecánicas y densidad, así como la evaluación del desempeño de las mismas mediante la aplicación de éstas en el cálculo de una estructura que lleve sus propiedades a la práctica.

Para lograr alcanzar el cometido principal se plantean una serie de objetivos específicos que se detallan a continuación;

- i) Determinación de las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, y resistencia a flexión) y la densidad de la madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis*.
- ii) Cálculo de los valores característicos de las propiedades fundamentales (módulo de elasticidad, resistencia a flexión y densidad) para la asignación de clase resistente según los criterios y exigencias establecidos en la normativa relacionada.
- iii) A modo de aplicación de los resultados obtenidos, la realización del estudio de la estructura de un puente de 15 metros de largo a realizar con MLE de *Eucalyptus grandis* de origen nacional.

Capítulo 3:

Antecedentes

3.1. Introducción

La madera es un material que ha sido utilizado por el ser humano desde sus orígenes, inicialmente la usó como combustible o para la realización de utensilios y herramientas, y posteriormente, para a construir chozas que le sirvan de refugio (Puy, 2015).

La madera, al contrario de los materiales homogéneos y artificiales (como es el acero y como es considerado el hormigón a la hora de calcular, entre otros), cuyas propiedades son bien conocidas y determinadas en el momento de su fabricación, es un producto biológico y su comportamiento mecánico depende del árbol del que procede y las solicitaciones que ha tenido que soportar durante su vida. La misma posee las complicaciones propias de un material heterogéneo y anisótropo, sufre cambios en sus dimensiones por causa de la variación de humedad y es vulnerable al ataque de insectos y hongos (cuando no ha sido tratada adecuadamente).

De la madera derivan los productos de ingeniería de madera (*Engineered Wood Products* -EWP- por sus siglas en inglés), los mismos son materiales compuestos que se forman por la unión de elementos de madera aserrada o madera sólida mediante la utilización de adhesivos u otros métodos de fijación. Estos productos se realizan en base a las especificaciones de diseño de la estructura de la que formarán parte y deben cumplir con una serie de criterios de fabricación para ser considerados de uso estructural.

En la Figura 3.1 se pueden observar algunos de los productos de ingeniería en madera existentes en el mundo dentro de los que se encuentran los contrachapados, los tableros de virutas orientadas (OSB), paneles de madera contralaminada (CLT), los tableros de fibras (de densidad alta HDF y media MDF), los compuestos de madera estructural (SCL) como son la madera microlaminada (LVL), vigas y tableros de virutas (PSL y LSL), los perfiles de viruta de madera orientadas (OSL) y la madera laminada encolada (MLE) entre otros.

Actualmente se encuentra muy extendido el uso de la madera laminada encolada (MLE o *Glulam* en inglés) con fines estructurales (Figura 3.1).

El proceso industrial de la MLE consiste en la fabricación de láminas a partir de piezas de madera aserrada adecuadamente seleccionadas unidas por las testas mediante “*finger-joint*”. Estas láminas se superponen y pegan por sus caras a través de un adhesivo estructural, las mismas se disponen con las fibras paralelas entre sí y en dirección paralela al eje longitudinal del elemento que conformarán. Mediante el proceso descrito se suma al producto original valor agregado brindando a los profesionales de la construcción un producto estructural muy útil y ventajoso.



Figura 3.1: Productos de ingeniería en madera. Fuente <http://www.apawood.org/>.

Cada producto de ingeniería de madera tiene asociado una normativa con los requisitos de fabricación, los ensayos iniciales tipo y los de control de calidad necesarios para ser considerado un producto estructural. En la Figura 3.2 se presenta un esquema general de los productos estructurales de ingeniería de madera considerados en la normativa europea (EN) para madera de coníferas. Como se puede observar la MLE se rige por las especificaciones de la norma EN 14080:2013.

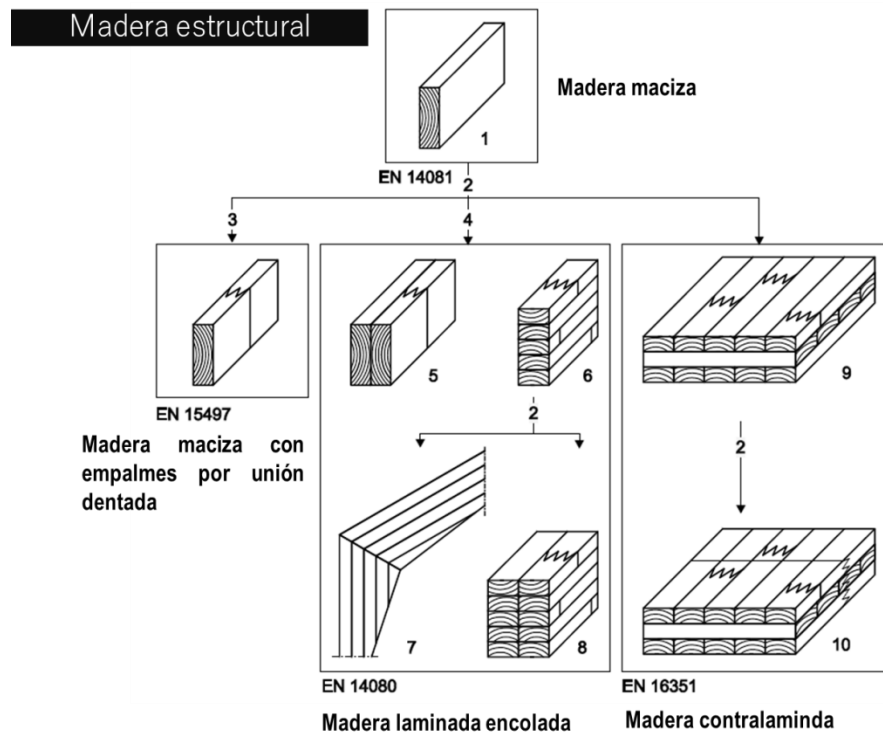


Figura 3.2: Elementos de madera estructural y sus correspondientes normas europeas de requisitos de fabricación (EN 14080:2013).

Para el empleo de la madera con fines estructurales es necesario conocer su clase resistente, su clase de servicio y su clase de uso, estas consideraciones se utilizan para tener en cuenta las condiciones ambientales a las que estará sometida la estructura, así como también sus propiedades resistentes.

Clases resistentes

Brindan información sobre las propiedades estructurales de la madera aserrada y la madera laminada encolada. Los sistemas de clases resistentes buscan agrupar la madera en un conjunto de propiedades estructurales comunes (valores característicos de resistencia, rigidez y densidad).

La norma EN 14080:2013 distingue dos tipos de MLE: homogénea (GLh, cuando todas las láminas que conforman la pieza son de la misma clase resistente) y combinada (GLc, cuando las láminas externas que conforman la pieza tienen una clase resistente mayor que las internas). Las letras van acompañadas de un valor numérico que se corresponde con el valor de resistencia característica de la pieza de MLE, la mencionada norma distingue 7 clases de GLh (que van de GL20h a GL32h) y de igual forma 7 clases de GLc (desde GL20c a GL32c).

Clases de Servicio

La madera por ser un material higroscópico y natural presenta propiedades físicas y mecánicas que son susceptibles a las condiciones ambientales que la rodean, es por esto que se definen clases de servicio. Éstas se utilizan en la etapa de cálculo estructural para disminuir las propiedades mecánicas de la madera en función de la exposición al ambiente de los elementos estructurales, penalizando más las propiedades cuanto mayor es el contenido de humedad. Las mismas se clasifican en Clase 1, Clase 2 y Clase 3 y se encuentran establecidas en el Eurocódigo 5, parte 1-1.

Clases de uso

Las condiciones ambientales no solo inciden en las propiedades estructurales de la madera sino también en que tan susceptible la misma será al deterioro biológico. Este concepto está relacionado con la probabilidad de que el elemento estructural sufra ataques por agentes bióticos lo cual depende principalmente del grado de humedad que la madera alcanzará durante su vida útil. Esto último se encuentra directamente relacionado con las diferentes exposiciones ambientales a las que eventualmente podrá estar sometida la madera.

Las clases de uso se detallan en la norma EN 335 (2013). Por otra parte, en función de las clases de uso, el Código Técnico de la Edificación (CTE) especifica, para el caso de la madera estructural, el tratamiento y las características del producto protector a emplear así como el nivel de penetración (NP) de dichos tratamientos protectores (los NP se encuentran establecidos en la norma UNE EN 351-1:2008).

3.2. El eucalipto

3.2.1. Taxonomía y distribución

El eucalipto o eucaliptus (*Eucalyptus ssp.*) es un árbol de la familia de las mirtáceas originario de Australia, Tasmania y Nueva Guinea.

El género, que incluye más de 600 especies (en su mayoría de origen australiano), posee una gran variedad de ecosistemas y una enorme diversidad del género, lo que hace posible encontrar eucaliptos adaptados a todo tipo de condicionantes ecológicos distribuyéndose en la actualidad por gran parte del mundo (de la Lama Gutierrez, 1982).

En suelos adecuados es una de las especies de mayor rendimiento. Gracias a su rápido crecimiento estos árboles se emplean con frecuencia en plantaciones

forestales para la industria papelera, maderera o para la obtención de productos químicos (FAO, 2001).

3.2.2. Origen y evolución histórica en Uruguay

Las primeras introducciones de eucaliptos a Uruguay datan del año 1853 y se relacionan directamente con la industria ganadera y frigorífica ya que se cultivaron con el fin de generar bosques de abrigo y sombra para el ganado.

Si bien las plantaciones de eucalipto fueron creciendo a lo largo del tiempo, recién en la década de los 90 se constató un alza significativa en las mismas por causa de dos principales factores; en primer lugar, la creación de instrumentos de apoyo financiero específicos para proyectos de investigación y desarrollo en el área de la madera, en segundo lugar, un impulso de políticas gubernamentales que incentivaron la forestación, más específicamente la (Ley Forestal, 1988) aprobada en 1988 que se implementó a partir de 1990.

A partir de la instalación de las plantas de celulosa de Botnia (hoy UPM) y Montes del Plata así como la ampliación en la industria de maderas aserradas y contrachapadas, entre otros factores, se registró a partir del año 2006 un importante incremento del área forestada y reforestada. Las plantaciones fueron realizadas en zonas de suelos previamente determinados y corresponden fundamentalmente a las especies de rápido crecimiento: *Eucalyptus* y *Pinus* (como se puede ver en la gráfica de la Figura 3.3 que muestra las hectáreas de suelo forestadas por las distintas especies hasta el año 2010).

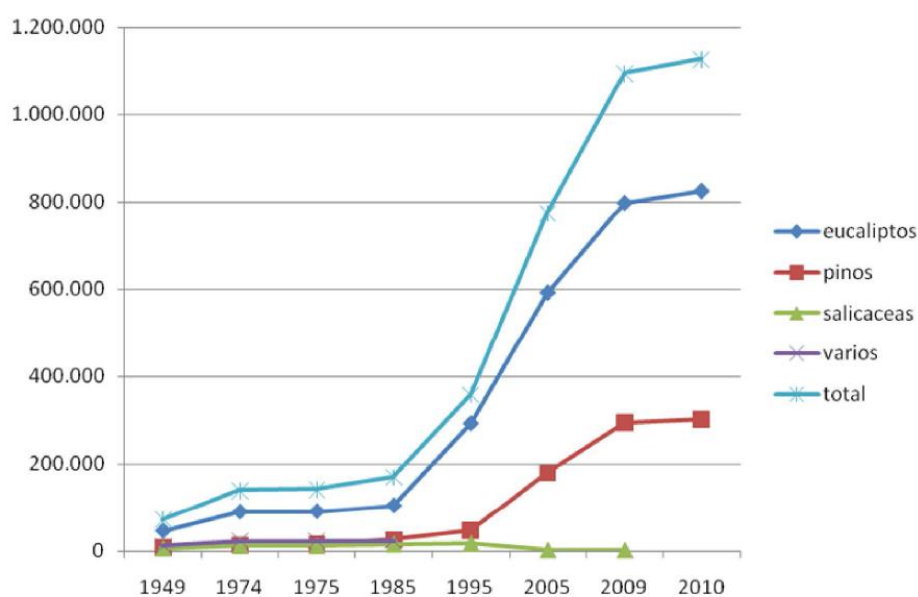


Figura 3.3: hectáreas de suelo forestadas por las distintas especies hasta el año 2010 (MGAP, 2010).

Según información de la Dirección General Forestal, Uruguay cuenta con un área total forestada de 1.841 mil hectáreas, de las cuales 850 mil hectáreas corresponden a bosques nativos y cerca de 1 millón de hectáreas a plantaciones, predominando el género eucalipto con 726 mil hectáreas forestadas seguido de pinos con 258 mil hectáreas. En el gráfico de la Figura 3.4 (MGAP, 2016) se puede observar cómo se reparte la superficie forestada por especies ocupando el *E. grandis* el 25% del área forestada registrada (251 mil hectáreas).

Parte de esta masa forestal, está siendo cosechada a edades de 15 y 25 años (Moya et al., 2013) lo cual implica que en la última década ha habido un incremento significativo de la disponibilidad de madera de procedencia local en el país.

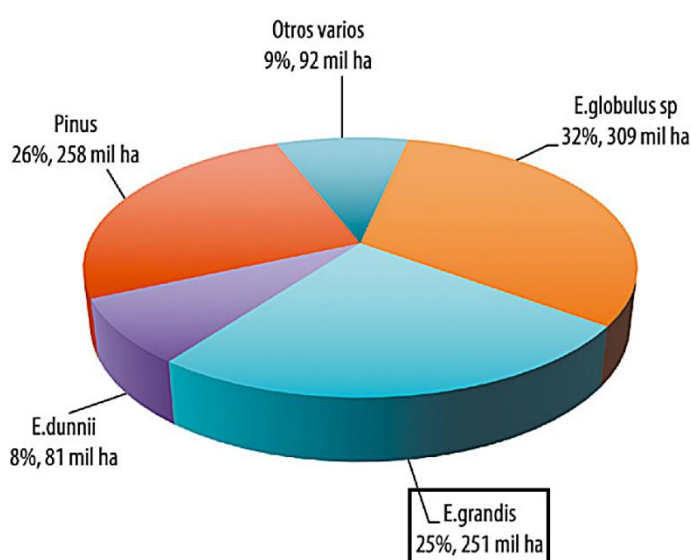


Figura 3.4: Superficie forestada registrada en el año 2013 por especies (en ha y como porcentaje del total). (MGAP, 2016).

3.2.3. Descripción de la madera de eucalipto en Uruguay

Las maderas de eucalipto crecidas fuera del lugar de origen tienen algunas diferencias con las australianas debido a su rápido crecimiento y a su menor edad a la cosecha, sin embargo las características esenciales de cada especie se mantienen (Mantero, 1995), es por esto que a continuación se mencionarán características generales de la madera de eucalipto.

Características Organolépticas

En lo que respecta al color tienen una pronunciada diferencia entre el color de su duramen (centro) y el de su albura (parte externa del tronco). Por otra parte se consideran maderas sin olor ni sabor, tienen un vetado suave, y en cuanto a la

dirección de las fibras el mejor comportamiento lo tiene el *E. grandis* cuyas fibras van de derechas a ligeramente entrelazadas (Sánchez, 1995).

Características Físicas y Mecánicas

La madera es un material heterogéneo y anisótropo, por esto último la misma presentará propiedades mecánicas diferentes en sus tres direcciones: radial, longitudinal y transversal (Pérez Zerpa et. al, 2017) que pueden observarse esquemáticamente en la Figura 3.5.

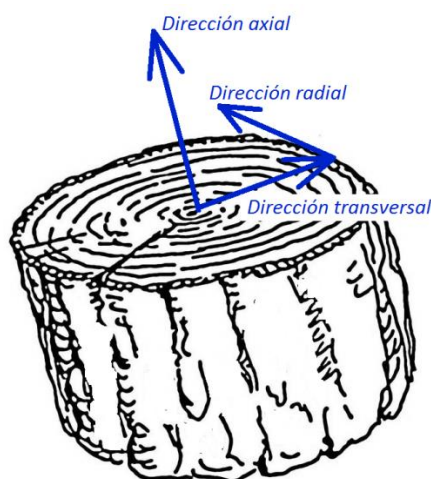


Figura 3.5: Direcciones longitudinal, transversal y radial de la madera.

La heterogeneidad genera incertidumbres en su comportamiento mecánico y sus respuestas estructurales requiriendo el uso de coeficientes restrictivos que reducen drásticamente la eficacia de este material (Guindos & Guaita, 2013).

Además, no presenta un comportamiento igual ante cargas de compresión y tracción cuando se evalúa el diagrama tensión-deformación (Figura 3.6). Por ejemplo, la relación tensión-deformación para madera seca cargada en el sentido perpendicular a la fibra es por lo general no lineal desde el origen y se achata al aumentar la tensión. En contraste el comportamiento tensión-deformación en madera seca traccionada en dirección perpendicular a la fibra es virtualmente lineal hasta la falla. Esta diversidad en las características tensión-deformación en madera estructural representa desafíos respecto al modelado de su comportamiento bajo cargas (Patton-Mallory et. al, 1997).

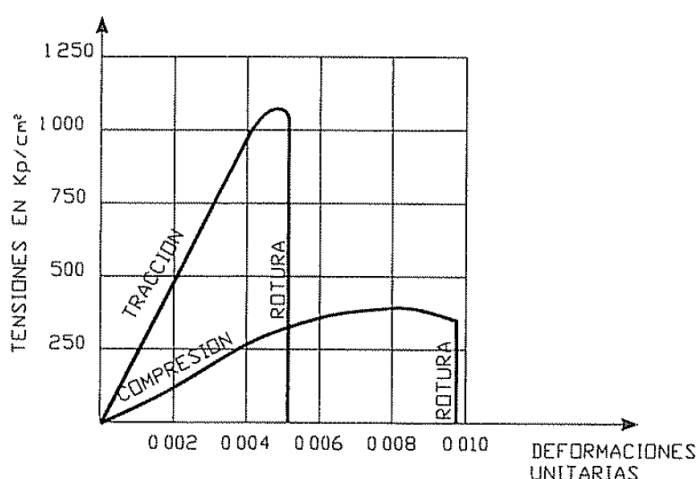


Figura 3.6: Relación entre tensión y deformación en compresión paralela a la fibra (Argüelles, 1996).

Según Sánchez (1995) la madera de *Eucalyptus grandis* se clasifica como una madera resistente si relacionan los valores de resistencia del material con su peso específico, liviana (con densidades de 350-500 kg/m³), y blanda (lo cual facilita su industrialización, especialmente el aserrado).

En lo que respecta al contenido de humedad, el *Eucalyptus grandis* recién apeado supera frecuentemente el 100% de humedad. Junto con el aumento de la humedad, se incrementa el peso propio y disminuye la resistencia de la madera. Por lo anterior, cuando se habla de madera estructural se refiere a las propiedades mecánicas de la misma a un contenido de humedad de referencia del 12%, pasando a ser el conocimiento del contenido de humedad un parámetro esencial al referirse a la madera estructural.

Estudios realizados en Uruguay

El sector de productos forestales del LATU en conjunto con la Sociedad de Productores Forestales y la Dirección General Forestal del M.G.A.P realizaron estudios sobre las propiedades mecánicas de la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* del Norte y Centro de Uruguay en los años 2004 y 2006 respectivamente. Resulta interesante colocar estos valores como antecedentes del presente trabajo, pero se debe tener en cuenta que los mismos son estudios realizados sobre madera aserrada, sin realizar ningún tipo de correcciones por humedad de las piezas y sin tener en cuenta la normativa de cálculo estructural.

Promediando los valores obtenidos en ambos estudios se puede decir que; para madera aserrada de *Eucalyptus grandis* del norte y centro del país los valores medios del módulo de elasticidad, módulo de rotura (determinados por medio del ensayo a flexión) y densidad obtenidos fueron los indicados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Valores medios de resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad.

<i>Máquina Universal</i>		<i>Densidad aparente corriente (kg/m³)</i>
<i>MOE (MPa)</i>	<i>MOR (MPa)</i>	
11597,5	48,3	481,5

Además de lo anterior los estudios también concluyeron que, cuanto más edad tiene la madera, mayores son sus propiedades mecánicas.

Características de durabilidad

Estudios de Böthig et al. (2008) realizados en Uruguay muestran que la madera juvenil de *E. grandis* puede clasificarse como “moderadamente durable” frente a ciertos hongos mientras que, la madera de transición hacia la madera adulta puede describirse como “durable” en base a ensayos realizados según la norma EN 350-1(1995). Lo anterior obliga a proteger a la madera de esta especie del contacto directo con el agua.

Facilidad de Impregnación

Vignote y Martínez (2006), plantean que la facilidad de impregnación de una madera es una característica deseable cuando la misma no es durable. Si se requiere durabilidad y la madera no presenta esta cualidad por sí sola, la misma ha de ser conferida mediante la aplicación de productos protectores insecticidas y/o funguicidas, mediante impregnación, u otras técnicas.

Los mencionados autores además mencionan que la madera de eucalipto puede ser clasificada como “poco impregnable” lo que implica que, luego de 2 o 3 horas de tratamiento a presión, se obtienen pequeñas penetraciones que van de los 3 a los 6 milímetros. Sólo la albura de la madera de *E.grandis* es impregnable, no pudiéndose aplicar tratamiento protector por impregnación en el duramen (que ocupa casi la totalidad de la sección de una troza de *E.grandis*).

Para la utilización de la madera de eucalipto en estructuras (en especial aquellas que se encuentran en ambientes exteriores y de alta humedad) es fundamental la protección por diseño que se le puede dar a la misma, evitando zonas de acumulación de agua que puedan llevar al desarrollo de hongos de pudrición.

Aserrado

La madera aserrada de esta especie comercializada en Uruguay suele tener un espesor de 1' o 1,5'' (25 o 40 mm aproximadamente) por 4, 6 u 8 pulgadas de ancho (esto es 100, 150 u 200 mm) y 2,5 a 4,5 metros de largo.

Secado

Como se mencionó anteriormente cuando se trató el tema del contenido de humedad en la madera, el eucalipto puede superar el 100% de humedad luego de apeado, esto se vuelve importante en la comercialización y el secado, ya que son grandes los volúmenes de agua que se deben desalojar.

Para la determinación de las propiedades mecánicas de una pieza de madera se debe secar la misma a un contenido de humedad del 12%. Además el contenido de humedad es un parámetro que debe ser cuidadosamente controlado en el proceso de fabricación de madera laminada encolada para que el adhesivo actúe de manera correcta.

Industrialización y comercialización de la madera en Uruguay

Según “Caracterización de la forestación en Uruguay,” (2011), las industrias forestales existentes en el país son relativamente pocas. En Uruguay hay dos aserraderos de gran tamaño: Fymnsa (pinos, Rivera) y URUFOR (eucalipto, Rivera) y cuatro de tamaño medio: Tingelsur S.A. (en Zona Franca de Rivera), Forestal Caja Bancaria (en Paysandú), Maserlit y Agüia (en Río Negro).

En cuanto a las empresas de laminación de madera, son pocas las que existen (Urufor, Raíces y Ludinel son las de mayor tamaño), pero en la actualidad ninguna de ellas fabrica productos estructurales, sino únicamente laminados con potencial uso de carpintería, aunque, la realidad es que estos son comercializados en barracas como productos estructurales y son utilizados en edificaciones en Uruguay con fines estructurales.

3.3. Adhesivos estructurales

3.3.1. Definición

Un adhesivo es un material que permite la unión entre dos superficies o substratos funcionando como puente entre ellas, sean del mismo material o no.

Estos productos logran unir las superficies a través de dos fuerzas esenciales: la adhesión y la cohesión (como aparece en el esquema de la Figura 3.7). La adhesión es la fuerza de unión que existe entre el adhesivo y el substrato mientras

que la cohesión es la resistencia ejercida en el interior del adhesivo. (García, 2013).

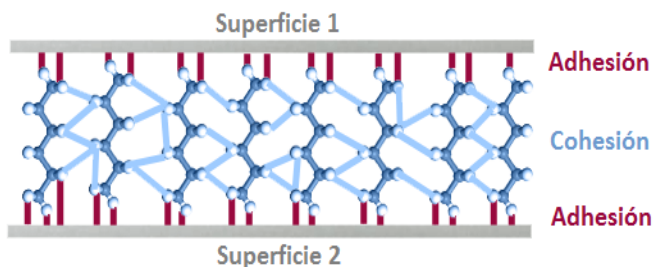


Figura 3.7: Esquema adhesión y cohesión. Fuente <http://medicinaug3.blogspot.com.uy/2015/08/adhesion-y-cohesion.html>.

La capacidad de retener materiales juntos no es una propiedad intrínseca del adhesivo sino que depende del contexto en el que éste se utiliza. La adhesión depende de tres factores:

- i) Mecánico: la rugosidad y el acabado superficial de los sustratos a unir
- ii) Físico: se relaciona con la humectación de las superficies a unir
- iii) Químico: tiene que ver con la naturaleza y afinidad que existe entre el sustrato y el adhesivo

El adhesivo, luego de ser aplicado alcanza sus máximas propiedades tras el proceso de curado o fraguado que consiste en la transformación del mismo desde un líquido, más o menos viscoso, hasta un sólido. Este proceso puede durar, en función del adhesivo, desde escasos segundos hasta varias semanas (García, 2013).

Clasificación de los adhesivos estructurales para madera

Los adhesivos más comúnmente utilizados para la fabricación de los EWP son los sintéticos, éstos son productos de la industria química cuyas materias primas son derivadas del petróleo o gases naturales.

- i) Fenólicos y Aminoplásticos
- ii) Emulsión Polímero Isocianato (EPI)
- iii) Poliuretano monocomponentes de curado húmedo (PUR)

El adhesivo usado para la realización de las vigas de MLE de *Eucalyptus grandis* es de monocomponente de poliuretano de curado húmedo conocido como PUR.

A continuación se muestra una tabla con las propiedades del adhesivo extraído del boletín técnico que el fabricante proporciona. El mismo es llamado Plaster PUR-20 Estructuras y es fabricado por la empresa Bakar (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Propiedades de adhesivo PUR. (Bakar, 2003).

<i>Base</i>	Poliuretano monocomponente
<i>Color</i>	Blanco Amarillento
<i>Densidad</i>	Aprox. 1,12g / cm ³
<i>Viscosidad (20 °C) Brookfiels RVT</i>	Aprox. 7000 mPa.s
<i>Consistencia</i>	De buen derrame

3.4. Madera laminada encolada

3.4.1. Origen, evolución histórica y establecimiento como material de construcción

La dimensión del fuste del árbol y las limitaciones en la longitud del tronco y su diámetro fueron siempre una dificultad para construir en madera. La madera laminada encolada surgió de la necesidad de cubrir grandes luces, utilizando piezas rectas o curvas de madera y, si bien es difícil establecer una fecha exacta que marque el origen, está claro que la aparición de los adhesivos estructurales marcó un antes y un después en el desarrollo de este producto (Somoza, 2015).

Los primeros indicios de madera laminada datan aproximadamente del año 1500 cuando Leonardo Da Vinci en sus esbozos de ingenios militares, planteaba la utilización de láminas de madera unidas por cuerdas y herrajes metálicos (Somoza, 2015). Sin embargo, el inicio de la madera laminada encolada como tal tuvo lugar cuando, gracias a los progresos de la industria química, se reemplazaron las bridas, tornos, clavos y otros sistemas metálicos por la caseína (conocida también como cola de carpintero) para la unión de las diferentes láminas que componen el material. Oficialmente la madera laminada encolada nació a principios del siglo XX cuando, surgió la primera patente del sistema de fabricación y método de construcción de este producto (Puy, 2015).

3.4.2. Madera Laminada Encolada en Uruguay y en la región

Uruguay

En Uruguay el uso de madera en construcciones aún es un tema incipiente y su mayor utilización es en la segunda vivienda, por lo general en balnearios.

En el mercado se puede encontrar actualmente madera aserrada que no cuenta con las especificaciones técnicas sobre su aptitud estructural, durabilidad y calidad geométrica. En cuanto al tratamiento protector, se comercializa madera impregnada en sales CCA (Cobre, Cromo y Arsénico) que por lo general tampoco

contiene información sobre el grado de penetración y retención del preservante. (Moya et al., 2015)

Como se dijo previamente, en lo que respecta a la MLE, cabe destacar que la misma está sujeta a las incertidumbres de la madera aserrada con la que se fabrica. Asimismo tampoco se conoce de forma certera la interacción madera-adhesivo ni del proceso de fabricación, más aún cuando la madera con la que se trabaja es una frondosa (como sucede con el eucalipto). Todo lo dicho implica que la madera laminada encolada que se fabrica en el país aún no está certificada estructuralmente. A pesar de esto, varios son los ejemplos de utilización de estos productos laminados cumpliendo una función estructural en Uruguay. Algunos de los cuales se muestran en la Figura 3.8.



Figura 3.8: A la izquierda mercado agrícola de Montevideo, a la derecha termas del Dayman de Salto (Fuente: <http://www.saltoalanaturaleza.com.uy/>).

Son varios los proyectos de investigación llevados a cabo en los últimos años en Uruguay que tienen como fin la normalización de la madera estructural, tanto aserrada como de productos de ingeniería de la madera, para su uso en estructuras. Los proyectos mencionados se presentan en la Tabla 3.3.

Argentina y Brasil

La situación de los países vecinos con respecto a la MLE se encuentra en una etapa más avanzada que en Uruguay, ya que cuentan con una normativa técnica que avala su utilización (IRAM 9660-2005, CIRSOC 601 o NBR 7190).

La existencia de estas normas no significa que no se sigan desarrollando nuevos procesos constructivos o técnicas de fabricación que apunten a mejorar la resistencia, durabilidad, etc., de la madera en cuestión.

En ambos países se cuenta con gran cantidad de trabajos que buscan mejorar la calidad de la MLE, ya sea con una distinta clasificación de la madera a utilizar o la implementación de un nuevo adhesivo, algunos de estos trabajos son los de

Piter et al, 2006 o dos Anjos & Alves, 2006 que se utilizaran para comparar con los resultados obtenidos a nivel nacional.

Tabla 3.3: Proyectos de investigación en madera estructural llevados a cabo en Uruguay por FING-ORT-LATU.

<i>Título del proyecto</i>	<i>Fondo y organismo financiador</i>
Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (<i>P. elliotii</i> y <i>P. taeda</i>) asociada a grados estructurales	FONDO MARÍA VIÑAS-ANII, 2010
Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal	FPTA-INIA, 2012
Estudio de las propiedades estructurales de vigas de madera laminada encolada de <i>Eucalyptus grandis</i> producida en Uruguay para su asignación a clases resistentes	INNOVAGRO-ANII, 2013
Evaluación de la madera de pino por clasificación visual para uso estructural	FONDO INDUSTRIAL-DNI, 2013
Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera	FONDO INDUSTRIAL-DNI, 2014
Determinación experimental del comportamiento elasto-plástico de la madera de <i>Pinus elliotii</i> de procedencia uruguaya y aplicación en el desarrollo de modelos de elementos finitos para el cálculo estructural	BECA INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN-ANII, 2014
Determinación de las constantes elásticas de madera de <i>Pinus elliotii</i> y <i>Pinus taeda</i>	BECA INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN-ANII, 2014
Panel estructural autoportante de madera contralaminada (CLT) a partir de madera de pino proveniente de raleos	DESARROLLO DE PROTOTIPOS-FUNDACIÓN RICALDONI, 2014

3.4.3. Campo de aplicación de la MLE

La madera laminada encolada presenta varias ventajas frente a otros materiales a la hora de ejecutar diversos tipos de construcciones, entre ellas se encuentran:

Ventajas arquitectónicas

El diseño de estructuras en madera tiene un componente de alto valor estético. Por otra parte, la MLE es un producto muy versátil que permite fabricar piezas de diversas formas.

Ventajas técnicas

La madera tiene un bajo coeficiente de conductividad térmica, lo anterior sumado a la capa carbonizada (6 veces más aislante que la propia madera) que se forma en la superficie de ésta bajo la acción del fuego hace que este material no arda rápidamente (Argüelles, 1996).

La madera posee una elevada resistencia a la flexión en relación a su peso, siendo 3,6 veces superior que a la del acero y 10 veces superior a la del hormigón. Por otra parte presenta un bajo módulo de elasticidad (mitad que el del hormigón y veinte veces menor que el del acero), esto repercute directamente en las deformaciones (Argüelles, 1996).

Finalmente, resulta interesante mencionar que la madera es durable en ambientes químicos agresivos, especialmente frente a cloruro sódico y nitratos. (Argüelles, 1996).

Ventajas ambientales

La madera, al ser natural, es el único material de construcción sobre la tierra que “vuelve a crecer”, es sustentable. Además la energía necesaria para la obtención y transformación de la madera es más baja que la que requieren otros materiales comúnmente usados en la construcción. Asimismo, la contaminación producida durante el proceso de producción es mucho menor que la de los elementos tradicionales utilizados en el rubro de la construcción, esto se da gracias a procesos productivos más limpios que permiten, entre otros, el almacenamiento de carbono en su proceso de formación y el ahorro energético en su transformación y utilización (Ramage, 2016).

En un estudio comparativo, realizado por el Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, se presenta el proceso de fabricación de un puente de madera laminada encolada y madera contralaminada como alternativa al enfoque tradicional de estructura de hormigón. En el mismo se analizan las emisiones de CO_2 al ambiente y el coste de fabricación y montaje del puente en función del material con el que se construye, concluyendo que aunque la madera presenta costos mayores la misma tiene balances negativos de emisiones de CO_2 contrastando con el hormigón armado que presenta el comportamiento opuesto.

A nivel mundial la sociedad se encuentra cada vez más sensibilizada respecto a los temas medioambientales, esta actitud del ser humano que tiende a ser más consciente con su entorno se ve manifestada no solo en las elecciones del consumidor (que busca productos más respetuosos con el medio ambiente) sino también en los empresarios que van tomando responsabilidad sobre los aspectos

que se relacionan con el desarrollo sostenible. Por lo anterior, existe una creciente tendencia a adoptar procesos productivos más limpios y amigables con la naturaleza, motivo por el cual la utilización de madera se ha vuelto una ventaja competitiva para las empresas.

3.5. Cuerpo normativo

Como ya se mencionó en Uruguay no existe un cuerpo normativo consistente y coherente para la madera estructural que vaya desde el proceso de fabricación y caracterización de los materiales hasta las reglas de diseño, cálculo y ejecución en obra a adoptar. Lo anterior obliga al calculista a adoptar valores y consideraciones de normas extranjeras para poder construir con madera (Baño et al., 2015).

Las normas técnicas en Uruguay son realizadas a nivel nacional por comités especializados y publicadas por el Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). Las mismas son aprobadas en consenso y de aplicación voluntaria a menos que existan disposiciones reglamentarias o contractuales a través de las cuales las mismas se vuelvan de cumplimiento obligatorio.

En cuanto al cálculo estructural, hay dos tendencias a nivel internacional en función del método empleado. El método de los estados límite es el que sigue en el cuerpo normativo europeo y países como Brasil. El método de las tensiones admisibles es el que siguen Argentina y Chile. EEUU plantea la dualidad de ambos sistemas en sus normativas de cálculo estructural. Por lo tanto, hay dos maneras de presentar los valores característicos de las propiedades mecánicas de la madera en función del sistema de cálculo empleado.

3.5.1. Normativa europea

Europa es de las regiones con mayor regulación en lo que a madera estructural respecta, ya que es uno de los principales productores y consumidores de la misma. Cuenta con un cuerpo normativo consistente y coherente así como con un mercado CE (*Conformité Européenne*, en francés) especial que asegura las propiedades de la madera que se está empleando.

El cálculo estructural es aquello que tiene lugar desde el establecimiento de las acciones que solicitan una estructura hasta el desarrollo de los detalles constructivos de la misma. La norma europea que regula el cálculo estructural en madera es el Eurocódigo 5.

Una norma de cálculo estructural para un determinado material (en este caso madera) es complementada con las especificaciones técnicas que corresponden a ese material que se encuentran tabuladas en anexos nacionales o suplementos.

Además las normas de cálculo se complementan con un conjunto de normas de acompañamiento que incluyen entre otros, reglas de clasificación visual de madera, normas de fabricación y control de madera laminada encolada, procedimientos para la obtención de los valores característicos, etc.. Para madera laminada encolada las normas europeas son:

- i) EN 14080:2013: Esta norma especifica los requisitos de prestación de productos de madera laminada encolada y madera maciza encolada así como también los requisitos mínimos de fabricación. Brinda disposiciones para la evaluación y verificación de la conformidad y el marcado de los productos laminados encolados.
- ii) EN 408:2011: Esta norma establece los métodos de ensayo para la determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera aserrada y de la madera laminada encolada.
- iii) EN 14358:2016: Esta norma se utiliza para la determinación y verificación de los valores característicos partiendo de los resultados de ensayo de una muestra, ya sea de madera aserrada o se productos de ingeniería de madera, procedente de una población de referencia definida.
- iv) EN 384:2016: La misma se utiliza para la determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad para poblaciones definidas, aplicable únicamente a madera aserrada.

3.5.2. Propuesta normativa para Uruguay

Entre junio de 2014 y Julio de 2015 un equipo interinstitucional conformado por técnicos y profesionales del Departamento de Proyectos forestales del LATU, del Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República y de la Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT desarrollaron el proyecto “Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción en madera”.

El mencionado documento revisa el estado del arte de la normativa de cálculo estructural en madera a nivel internacional y propone un camino a seguir en Uruguay. Se realizaron una serie de jornadas estructuradas en talleres en las que participaron investigadores y expertos de la comunidad nacional e internacional en las cuales se propuso adoptar el cuerpo normativo europeo y generar normas UNIT de acompañamiento nacional así como también redactar Anexos Nacionales al Eurocódigo 5 para el cálculo estructural.

Se espera que los resultados de esta tesina de caracterización de MLE de *E. grandis* uruguayo provea información técnica que sirva como insumo para la

norma UNIT de requisitos de fabricación de MLE en Uruguay, con valores de las propiedades estructurales de la misma.

Por otra parte, en la actualidad no existe norma UNIT de cálculo estructural con madera. El único documento publicado que hace referencia a una metodología de cálculo, en base al método de las tensiones admisibles, es el IE-50, elaborado por el ex Instituto de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en el año 1950 (IET, 1950). Al final del documento se incluyen cuadros con las propiedades mecánicas para diferentes especies de madera, aunque ninguna de ellas se basa en datos provenientes de ensayos sobre madera de procedencia uruguaya y se desconocen tanto el nombre científico como también si los datos presentados se corresponden con valores medios o característicos.

Como se mencionó, en Uruguay se está trabajando en definir un método coherente entre la determinación de las propiedades mecánicas de la madera local y el cálculo de las estructuras utilizando estas especies. Según los resultados obtenidos del proyecto de investigación financiado por la DNI (FONDO INDUSTRIAL-DNI, 2014), y en base a reuniones con los responsables de elaborar las normas de cálculo estructural con madera en Argentina, Chile, Brasil y España, existe una propuesta para realizar la normativa de cálculo estructural en Uruguay según el método de los estados límite y de crear un Anexo Nacional uruguayo al Eurocódigo 5 con las condiciones locales para su aplicación (Baño et al., 2015).

Capítulo 4: Materiales y Metodología

4.1. Consideraciones generales

4.1.1. Proceso de fabricación y caracterización de la MLE

La metodología concebida en esta tesina para la caracterización de la madera laminada encolada se divide en varias etapas, cumpliendo cada una de ellas con los requisitos establecidos por diferentes normas. En el presente trabajo, tanto el proceso de fabricación como el de caracterización de la MLE se basaron en el cuerpo normativo europeo (EN). Dichas etapas se esquematizan en la Figura 4.1.

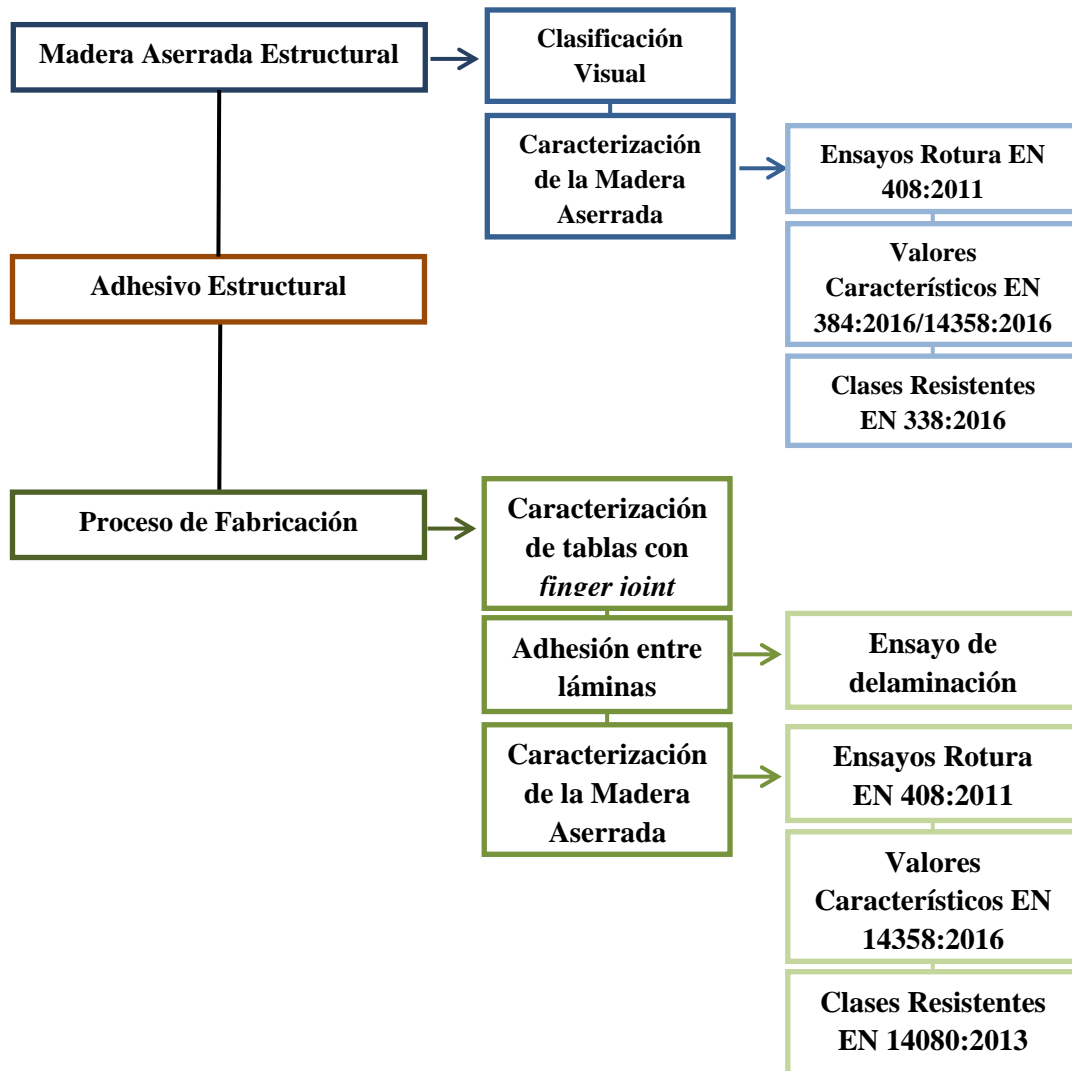


Figura 4.1: Requisitos de fabricación y caracterización de la MLE con base en la norma EN 14080:2013.

Requisitos de fabricación

Para poder comercializar piezas de MLE y garantizar que las mismas sean estructurales, la empresa hacedora debe seguir ciertos requisitos de fabricación. Los mismos se aplican a las materias primas que la componen, como lo son la madera aserrada y el adhesivo, y además al proceso que se desarrolla para la unión de los mismos.

Para establecer los requerimientos mínimos de fabricación este trabajo se basó en la EN 14080:2013, que, como se mencionó, es de aplicación a MLE fabricada con madera de las especies de coníferas, pero, sin embargo, en la misma se detalla que también es posible fabricar madera laminada encolada con madera de las especies de frondosas (basándose en los requisitos de la misma y en resultados de ensayos).

Madera Aserrada Estructural

La caracterización de la MLE se basa en el conocimiento de las propiedades de la madera aserrada con la que se fabrica. Las propiedades imprescindibles para caracterizar la madera aserrada son los valores característicos de la resistencia a flexión (o tracción paralela a la fibra), el módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra y de la densidad (EN 408:2011), luego, los valores característicos se calculan de acuerdo a la norma EN 384:2016.

Clasificación visual

El método de clasificación visual estructural de la madera se basó en la medición de las singularidades y características presentes en las piezas, tales como el tamaño de los nudos, la desviación de la fibra, la presencia de la médula, fendas, deformaciones, etc. Cada país tiene su propia norma de clasificación visual para sus propias especies, y ésta establece límites para los defectos anteriores que definen las diferentes calidades visuales. A su vez, cada calidad visual tiene su equivalencia en términos de propiedades físicas y mecánicas según la norma con la que se esté clasificando el material. Por lo anterior, la norma que regula esta etapa depende del país en el que se esté clasificando la madera.

Uruguay carece de norma UNIT de calidad visual estructural de la madera, por lo que se realizó una clasificación visual basándose en los requerimientos de mediciones de las singularidades de la norma IRAM 9662-2:2006, considerando que la especie *Eucalytus grandis* que crece en la zona litoral del país lindero se asemeja a la de estudio en este proyecto. Cabe destacar que esta norma se utilizó exclusivamente con el fin de rechazar tablas de madera con singularidades significativas que impliquen desmejoras en las propiedades mecánicas de las mismas.

La norma clasifica las tablas aserradas de *Eucalytus grandis* en dos clases de resistencia que se denominan Clase 1 y Clase 2, identificando a la madera de mayor resistencia con la Clase 1. Las tablas de madera aserrada seleccionadas para este proyecto obedecen a las características establecidas para una clasificación Clase 2. No se consideró la asociación de esta calidad a las propiedades mecánicas de la madera argentina, sino que estas propiedades fueron determinadas para la madera de procedencia uruguaya en base a ensayos de flexión.

Caracterización madera aserrada

Ensayos

La determinación de las propiedades mecánicas requiere el estandarizado de las metodologías, con el fin de que todos los trabajos de caracterización se encuentren bajo el mismo marco de ensayo y con criterios unificados. La norma EN 408:2011 expone, así, las metodologías de ensayo a nivel europeo para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada estructural. Las propiedades mecánicas y físicas mínimas que exige la normativa europea para caracterizar una especie de madera son: módulo de elasticidad medio en flexión, resistencia característica a la flexión y densidad característica.

Valores característicos de las propiedades mecánicas

El objetivo de caracterización de la madera estructural para su clasificación a nivel normativo requiere la aplicación de diversos parámetros correctores, es decir, el cálculo de los denominados valores característicos los cuales sirven de valores de entrada para la asignación de clase resistente. La norma EN 384:2016 define las expresiones matemáticas y las correcciones a realizar sobre los valores obtenidos en el ensayo de un lote o población determinada de madera aserrada estructural según la norma EN 408:2011.

La aplicación de las distintas correcciones responde, en primer lugar, a la necesidad de llevar los valores de las propiedades determinadas a condiciones de referencia con el fin de hacerlos comparables entre sí. Un ejemplo de esto es la corrección que se aplica a los valores obtenidos a través de los ensayos a aquellas piezas cuyo contenido de humedad al momento de ser ensayadas era distinto al 12%.

Además de la homogeneización en las condiciones de referencia, la norma EN 384:2016 define otras correcciones derivadas de la necesidad de establecer un margen de seguridad adecuado a la hora de asignar valores a sus propiedades mecánicas a partir del ensayo de una muestra determinada. La aplicación de índices penalizadores en función del tamaño de muestra ensayada a partir de la

cual se determinan la resistencia a flexión, supone un claro ejemplo de este concepto de margen de seguridad.

Determinación de clases resistentes

La alta variabilidad existente en las propiedades de las distintas especies y procedencias de la madera hace de su clasificación una labor compleja. Por este motivo, surgió la necesidad de la creación de un sistema de clasificación basado en distintos rangos de propiedades mecánicas, denominadas clases resistentes, determinadas en la norma EN 338:2016.

Adhesivos estructurales

Para que una pieza de MLE sea estructural es necesario que el adhesivo que une las láminas y *finger-joints* también lo sea. Se debe cumplir una adherencia adecuada, una resistencia a las fuerzas de corte y fatiga, así como también a la exposición ambiental, altas temperaturas, corrosión y ataque químico entre otros. Es por esto que la norma EN 14080:2013 recomienda los adhesivos adecuados a utilizar, indicando que los mismos deben producir uniones duraderas en los productos de madera laminada encolada de forma que se mantenga a lo largo de la vida útil de la estructura y para la clase de servicio que corresponda en el Eurocódigo 5, parte 1-1 (EN 1995:2004/AC:2006), tal y como se describe en el Apartado 3.3.

Proceso de fabricación

Cada fase del proceso, por sencilla que parezca, debe ejecutarse sin margen de error para no comprometer la calidad final del producto y poder conseguir las resistencias de interés y la durabilidad necesaria para la composición de estructuras. Es por esto que el proceso de fabricación de este producto, debe ser regularizado por normas que aseguren el correcto rendimiento del producto final. Las vigas elaboradas en esta investigación rigen su fabricación según la norma EN 14080:2013, el cuál detalla los requisitos mínimos de fabricación según el anexo I.

Es necesario destacar que hay una propuesta de adaptación de la norma para que la misma pueda ser utilizada en Uruguay actualmente, ya que los equipos para poder desarrollar las distintas etapas no tienen la misma tecnología que los utilizados en Europa. Sin embargo, se quiere probar que aún de esta manera se pueden lograr piezas de competencia internacional.

Caracterización

Al igual que para la caracterización de la madera aserrada, el fin de una normativa en la etapa de caracterización radica en el estandarizado de las metodologías con el fin de conseguir valores de reconocimiento universal.

Para el caso de la caracterización de la MLE se deben tener en cuenta dos partes, una basada en la caracterización de las tablas con *finger-joints* y otra en la caracterización en base a las piezas ya constituidas como tales. Ambas etapas encuentran las normas que las regulan en la norma EN 14080:2013.

Caracterización de láminas con finger-joints

La longitud de los *fingers* de la unión dentada, la presión que se le aplica y el tipo de adhesivo utilizado son factores que deben ser tenidos en cuenta a la hora de elaborar un producto estructural como el que se encuentra en estudio. Es de gran importancia verificar el rendimiento mecánico de la unión mediante ensayos de flexión y tracción y de esta manera justificar o ajustar los parámetros anteriores. Para este caso son de utilidad las consideraciones establecidas por la norma EN 408:2011 para el caso de los ensayos pertinentes.

Luego se debe calcular el valor característico de resistencia y el coeficiente de variación conforme la norma EN 14358:2016.

Por otra parte, el fabricante de madera laminada debe declarar la resistencia característica a flexión de tabla o en tracción de los empalmes por unión dentada.

Caracterización de la MLE

La caracterización se realiza a partir de ensayos a piezas de tamaño estructural de MLE.

Ensayos de flexión y densidad, determinación de los valores característicos y clases resistentes

Nuevamente se recurre a la norma EN 408:2011 para definir qué métodos serán empleados para determinar las siguientes propiedades: módulo de elasticidad en flexión, resistencia a la flexión y densidad de la pieza.

Por otra parte, para el caso de MLE es la norma EN 14080:2013 quien define las expresiones matemáticas y las correcciones a realizar sobre los valores obtenidos en el ensayo.

Las clases resistentes GL de las vigas ensayadas son determinadas también mediante la norma EN 14080:2013.

4.2. Esquema general de trabajo

Con base en todo lo mencionado anteriormente, para alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo de investigación se ensayaron vigas de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* producida en Uruguay.

En la Figura 4.2 se presenta el esquema general de trabajo adoptado para llevar a cabo este proyecto.

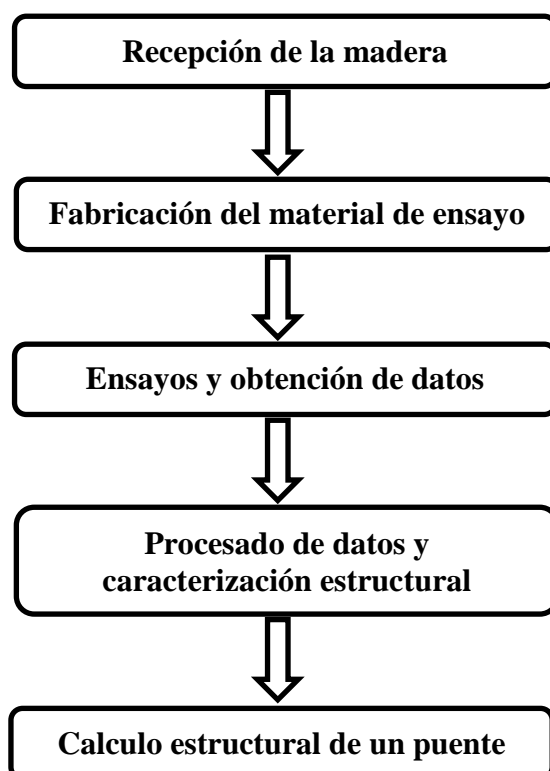


Figura 4.2: Esquema de trabajo

4.3. Material de ensayo

La norma EN 14080:2013 establece que, para cada clase y especie deben ensayarse un mínimo de 30 piezas según la norma EN 408:2011, por lo tanto, el conjunto de muestras de estudio se compone de un total de 33 vigas de madera laminada encolada estructural de *Eucalyptus grandis*, con un tamaño de sección de 94mm x 241mm x 5000mm aproximadamente.

La fábrica que produjo las vigas ensayadas se encuentra ubicada en Planta Industrial Amaiur en la Ruta 5 km 181.500 (en el departamento de Durazno), perteneciente a la empresa “Raíces”. El equipo de trabajo de esta investigación asistió a la empresa desde la clasificación visual de las láminas para la

constitución de las probetas, pasando por todo el proceso constructivo de las vigas, desde el aserrado de los *finger* hasta el prensado de las láminas.

La sección seleccionada fue considerada en base a las dimensiones comerciales más frecuentes (Figura 4.4).

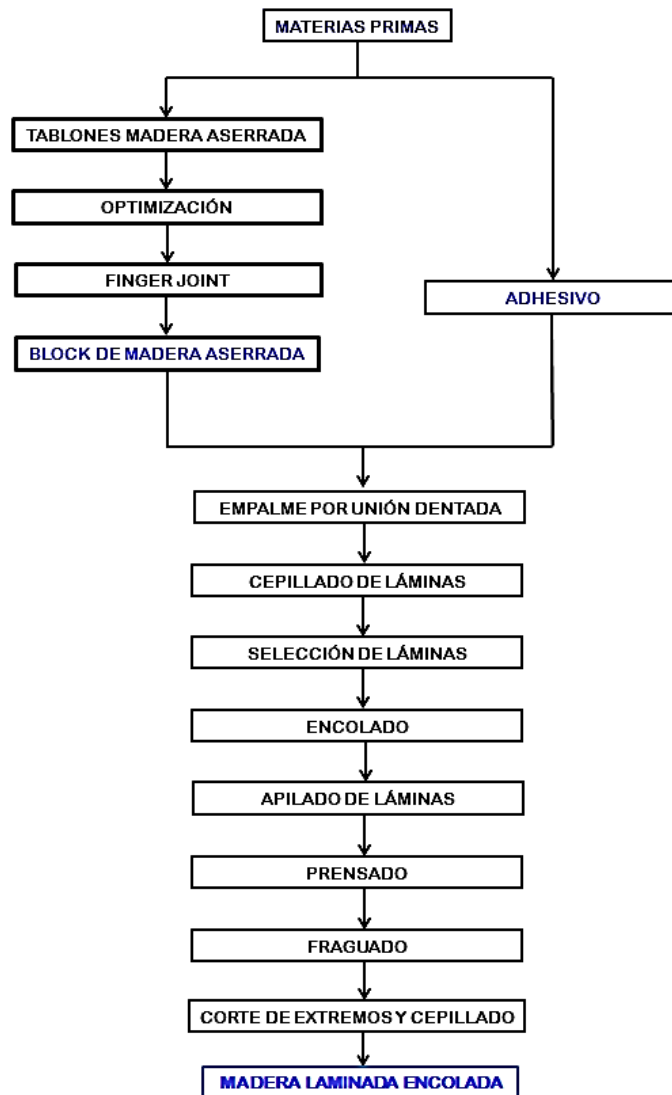


Figura 4.3: Esquema del proceso productivo de la madera laminada encolada.



Figura 4.4: Sección del material de ensayo

4.3.1. Esquema general de producción de MLE

Para llevar a cabo el proceso de fabricación que fue mencionado en apartados anteriores se utilizó madera seca (CH 12%), el adhesivo estructural adecuado y aplicar la presión correspondiente, entre otros requisitos que se detallan en la Figura 4.3.

4.3.2. Madera aserrada de partida

Tablas de madera aserrada

Para la elaboración de cada viga de MLE se utilizaron tablas de madera aserrada de sección 100mm x 28mm.

El proceso que se siguió desde la extracción de la madera de los bosques como materia prima hasta la obtención de tabloncitos como material, comprende una serie de pasos que se sintetizan en tala, descortezado y eliminación de ramas, aserrado y secado.

La madera se secó de forma artificial, con corrientes de aire cálido y seco cumpliendo con los requerimientos establecidos por la norma EN 14080:2013 que establece que para madera no tratada el contenido de humedad relativa debe comprenderse en el rango de 6-15 %.

Clasificación visual y optimización

El optimizado consiste en maximizar el volumen de madera libre de singularidades (nudos, rajaduras, fendas, etc) o limitar sus dimensiones. Esto hace referencia a la calidad visual de la madera de eucalipto, realizada después del cepillado a dos caras.

A falta de normativa UNIT de clasificación visual se clasificó la madera aserrada de eucalipto de acuerdo a la norma argentina IRAM 9662-2:2006 cuyos criterios para la Clase 2 son los descritos en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Criterios de calidad visual de tablonces de madera aserrada de *Eucalyptus grandis* para Clase 2.

<i>Criterios de Calidad</i>		<i>Clase Visual</i>
<i>Médula</i>		No se admite
<i>Nudos</i>		Menor o igual a 2/3
<i>Dirección de las fibras</i>		Desviación menor que 1:9
<i>Densidad</i>		No se aceptan piezas con densidad excepcionalmente baja
<i>Fisuras</i>	<i>No pasantes</i>	El largo de las fisuras no pasantes no debe ser mayor que 1,0 m ni que 1/4 de la longitud de la pieza
	<i>Pasantes</i>	Solo se permiten las fisuras pasantes en sus extremos y su largo no debe ser mayor que el ancho de la tabla
<i>Arqueadura y encurvadura</i>		Menor que 8
<i>Torcedura</i>		Menor que 1 mm por cada 25 mm de ancho
<i>Acanaladura</i>		Sin restricciones
<i>Arista faltante</i>		Transversalmente menor que 1/4 de la cara o canto donde aparece. Sin restricciones para el largo.
<i>Ataques biológicos</i>		No se admiten zonas atacadas por hongos causantes de pudrición. Se admiten zonas atacadas por hongos cromógenos. Se admiten orificios causados por insectos con diámetro inferior a 2 mm.
<i>Otros</i>		Daños mecánicos, depósitos de resina y otros defectos se limitan por analogía con alguna característica similar.

Las singularidades de la madera de *Eucalyptus grandis* medidas fueron las siguientes:

Nudos: la presencia de nudos de la madera supone la existencia de un porcentaje de madera distinta a la que lo circunda al tratarse del resultado de una zona de madera (rama) insertada en la pieza según dirección perpendicular y, por tanto, con distintas propiedades.

Desviación general de la fibra: al igual que en caso de las desviaciones locales provocadas por la presencia de nudos, las desviaciones generales de la fibra merman las propiedades resistentes en la dirección longitudinal de la pieza, en mayor medida cuanto mayor sea el ángulo de desviación.

Fendas: las hendiduras que aparecen en la madera, causadas generalmente durante el proceso de secado, en dirección longitudinal, son evaluadas en las normas de clasificación visual en base a su longitud y profundidad.

Deformaciones: las clasificaciones visuales evalúan las deformaciones provocadas por el secado en las piezas de madera, tanto las deformaciones en

relación a la cara y al canto de la pieza al igual que otro tipo de irregularidades como alabeos.

En la Figura 4.5 se muestran algunas de las singularidades presentes en la madera de *E. grandis*: a) fisuras pasantes, b) nudo mayor a 2/3 del ancho del tablón y c) una arista faltante mayor a 1/4 de la cara o canto donde aparece.

El optimizado de las tablas consiste en cortar bloques de longitud variable entre 300 y 1000mm de longitud, cuya presencia de singularidades cumplan con las exigencias de tamaño presentada en la Tabla 4.1 de clasificación visual.



Figura 4.5: Singularidades características tablonces de *Eucalyptus grandis* a) fisuras pasantes, b) nudo; y c) arista faltante.

Si bien la norma EN 14080:2013 no establece longitudes de bloques, debido a la capacidad de las máquinas que la empresa disponía para realizar los *fingers* necesariamente se cortaron bloques del tamaño antes mencionado. Luego, con base en la norma IRAM 9660-1-2005 se establece como largo mínimo para dichos bloques de 120mm.

Finger-Joint

Los bloques de madera se mecanizan en sus extremos (testas) en base a unas entalladuras múltiples (*finger-joints*) que sirven para su unión mediante encolado, y formar así las láminas de la longitud necesaria para fabricar las vigas de MLE Figura 4.6. Estas entalladuras cumplen una doble función:

- i) Aseguran una correcta transmisión de los esfuerzos aumentando la resistencia de la madera.
- ii) Evitan la desconexión por deslizamiento relativo de las piezas.

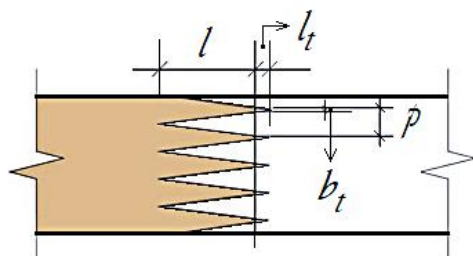


Figura 4.6: Producción de *finger-joints*

Las dimensiones del diente mecanizado en las vigas de estudio se corresponde con una longitud de 15 mm, según recomendaciones de la norma EN 14080:2013 para MLE, tal y como se muestra en la Tabla 4.2 que se referencia con los parámetros presentados en la Figura 4.7.

Tabla 4.2: Recomendaciones norma EN 14080:2013 para una buena ejecución de *finger-joints*.

<i>Longitud del diente l en mm</i>	<i>Paso p en mm</i>	<i>Anchura del diente b_t en mm</i>	<i>Factor de reducción v</i>
15	3,8	0,42	0,11
20	5,0	0,50	0,10
20	6,2	1,00	0,16
30	6,2	0,60	0,10



l longitud del diente

p paso

b_t anchura de la punta del diente

Figura 4.7: Valores de referencia para *fingers* según la norma EN 14080:2013

4.3.3. Fabricación de las vigas de MLE

Elaboración de las láminas

Empalme por unión dentada

Luego de obtenidos los diferentes trozos de madera con extremos en forma de sierras (*finger*) y de ser elegido el adhesivo que se adapta mejor a las condiciones que se desean obtener, se procede a unir las testas de las piezas con estas uniones dentadas y aplicar el adhesivo en este fresado, para finalmente encastrar y prensar

los fragmentos en el sentido longitudinal. Cada lámina está compuesta de tantos trozos como sean necesarios para alcanzar el largo deseado. La fabricación de las láminas se realiza en una máquina especialmente diseñada para ejercer presión sobre éstas, dando rigidez a las uniones (Figura 4.8). Estas láminas luego de unidas y prensadas se dejan en reposo con el fin de permitir la soldadura química de sus juntas.

Notar que en este paso el pegamento es introducido en los *fingers* de cada trozo de manera manual, y es por esto, que se debe tener especial cuidado en asegurar que todos los orificios sean adecuadamente cubiertos por el adhesivo. En la Figura 4.8 se puede ver cómo se lleva a cabo el procedimiento de encolado de hendiduras.

Cabe destacar además, que el adhesivo utilizado para unir los extremos es el mismo que se utiliza para pegar las láminas unas con otras (paso posterior) y la presión aplicada para unir los *finger-joints* es de 10 N/mm^2 y debe extenderse durante 2 segundos como mínimo.



Figura 4.8: Muestra de la instancia anterior y posterior a la aplicación de presión sobre la unión dentada.

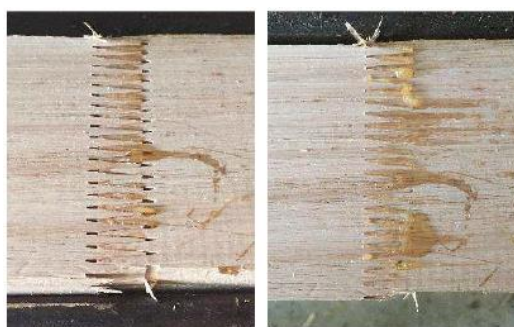


Figura 4.9: Pre y post aplicación de presión sobre testas.

El tiempo entre mecanizado del dentado y encolado del dentado debe ser menor a 6 horas para obtener una adherencia del adhesivo satisfactoria.

Cepillado de las láminas

Esta operación tiene como objetivo calibrar el espesor de las láminas, conseguir planos perfectos en las superficies a encolar y eliminar la suciedad y las células oxidadas de la superficie que pudiesen disminuir la adherencia entre si al aplicar la cola. Se cepillan las 4 caras para eliminar las imperfecciones de los encastres, tal como se muestra en la Figura 4.10, previendo que se eliminen entre 0,5-2mm de las capas superficiales de las láminas en todos sus sentidos.

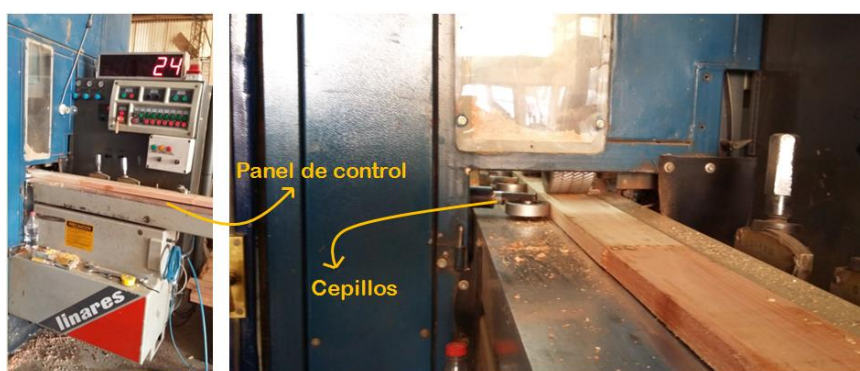


Figura 4.10: Cepillado de láminas.

El tiempo entre cepillado y encolado no debe ser superior a 24 horas para que la adherencia del adhesivo en la madera sea la adecuada.

Fabricación de las vigas

Configuración de las láminas

En esta etapa se busca elegir la configuración de láminas que conformarán cada una de las vigas a fabricar, tratando de evitar la sucesión de uniones de *finger* alineados verticalmente en láminas consecutivas.

En cuanto a dicha elección se denota que la norma europea EN 14080:2013 no define una distancia mínima entre *finger* de láminas consecutivas. Esto es debido al proceso de saneado de las tablas que se desarrolla habitualmente en Europa, con bloques largos y grandes distancias entre las uniones dentadas, haciendo que sea estadísticamente pequeña la probabilidad de que aparezcan dos uniones *finger* alineadas en dos láminas consecutivas.

Para las vigas fabricadas en el presente estudio se utilizaron bloques cortos y de longitudes variables por lo que fue necesario definir una distancia mínima de 120

mm (basado en la norma IRAM 9660-1-2005) de separación longitudinal de uniones *finger* en láminas consecutivas.

Para una correcta identificación, luego de elegidas las láminas se numeró cada una de ellas, para su posterior encolado y prensado, tal y como se muestra en la Figura 4.11.



Figura 4.11: Apilado de láminas respetando consideraciones técnicas.

Encolado

Las láminas ya cepilladas se introducen en la encoladora, pasando en continuo por un peine de encolado que deposita en una de sus caras la cantidad de adhesivo programado. La cantidad de adhesivo aplicado fue de 260 g/lámina y fue regulado y controlado instantáneamente según la velocidad de aplicación y el caudal de la bomba de inyección del adhesivo, tal y como se muestra en la Figura 4.12 en el tablero de control de la máquina de encolado.

La adhesivo empleado para la realización de esta etapa fue, al igual que en el caso de la unión entre *fingers*, el adhesivo estructural PUR. Para este tipo de adhesivos el fabricante del mismo recomienda que la dosificación de pegamento sea mayor o igual a 450 g/m^2 .

El procedimiento de encolado se puede visualizar en la Figura 4.13, donde se muestra cada paso de su realización. Como primera instancia se introduce la lámina por un sector donde se encuentra sujeta por rodillos, luego comienza a deslizar con velocidad constante por debajo de un aspersor de adhesivo, y cuando se completa el encolado de toda la sección, la lámina queda pronta para asociarse con otras.



Figura 4.12: Encolado de las láminas



Figura 4.13: Procedimiento de encolado de láminas.

El exceso de pegamento es eliminado de forma instantánea mediante un operario que vigila cada unidad luego de salir de su aplicación de adhesivo. Un error común durante el proceso de encolado se puede observar en la Figura 4.14, cuando la lámina no pasa de forma continua por debajo del dispensador de pegamento, debido, principalmente, a que las láminas no se deslizan entre los rodillos adecuadamente.

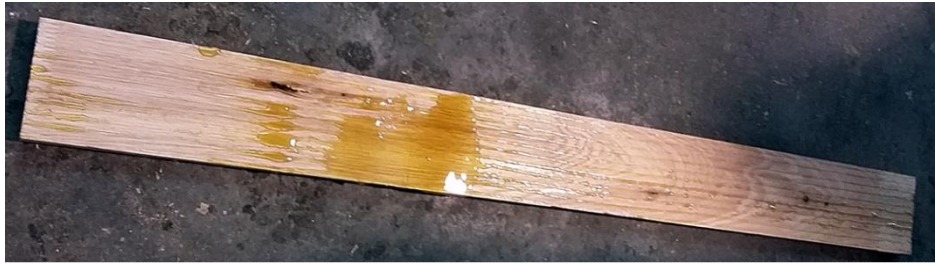


Figura 4.14: Exceso de cola luego de pasar por dispensador de adhesivo.

Apilado de láminas

Luego de que una lámina se encola por una de sus caras, se le coloca encima otra lamina también encolada por una de sus caras, haciendo que el contacto entre ambas sea entre una cara encolada con una cara sin encolar, esto se sigue realizando hasta conseguir la altura deseada en la pieza a prensar.



Figura 4.15: Apilado de láminas.

Prensado

El prensado de las láminas se realizó con una prensa mecánica vertical (Figura 4.15).

La norma EN 14080:2013 establece rangos de valores de presión según el espesor de las láminas empleadas para madera de conífera, que al no haber recomendaciones de valores para madera de frondosa, se toma como valor de referencia (Tabla 4.3).

Tabla 4.3: Rangos de valores de presión según espesor de láminas. EN 14080:2013.

<i>Espesor de láminas t en mm</i>	$t \leq 35$	$35 < t \leq 45$	$45 < t \leq 85$
<i>Presión de prensado en N/mm^2</i>	0,6 a 0,8	0,8 para láminas con ranuras 1,0 para láminas sin ranuras	0,8 a 1,0

Según la Tabla 4.3, para un espesor de láminas de $24mm$ la presión a aplicar debería ser entre $0,6 - 0,8 N/mm^2$, sin embargo, en el proceso de producción este valor fue superado ya que la presión aplicada fue de $1,2 N/mm^2$. Este valor, a pesar de ser superior al recomendado en la norma, es razonable porque se está fabricando MLE de *Eucalyptus grandis* lo que supone una madera de frondosas con una densidad y resistencia a compresión perpendicular superior a las coníferas (para las cuales están calibrados los valores de la norma).

Las juntas de encolado deben someterse a presión en un plazo máximo de una hora desde la aplicación del adhesivo, y se dejan en la prensa por 4 horas aproximadamente. Este tiempo de prensado lo define nuevamente el fabricante del adhesivo.

En la Figura 4.16 se aprecia el procedimiento descrito.

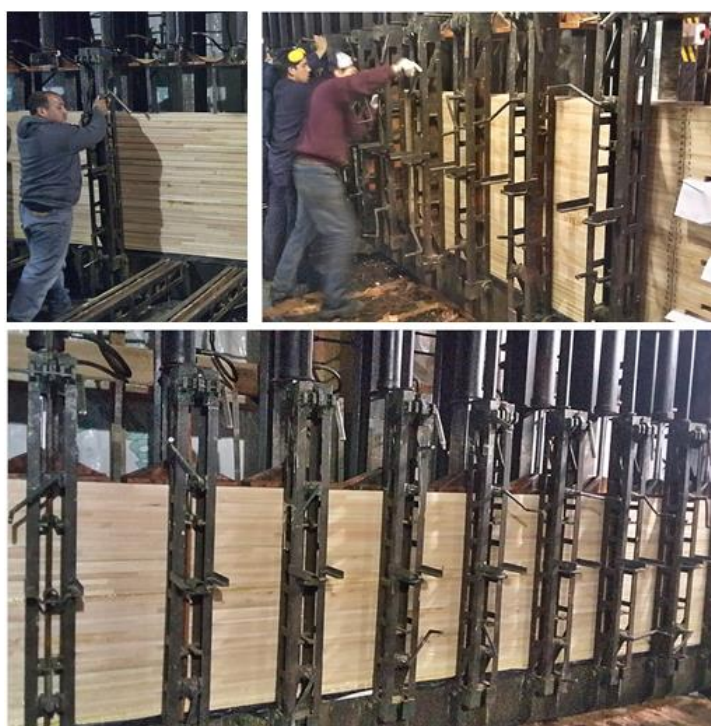


Figura 4.16: Máquina de prensado de vigas laminadas encoladas.

Fraguado

Luego de prensadas las vigas, se debe disponer de tiempo para que el adhesivo fragüe. En el proceso de fabricación de las vigas en Uruguay, esta etapa no cumple con las especificaciones que la norma EN 14080:2013 establece, ya que para esto, durante al menos 8 horas (tiempo disponible para que el adhesivo fragüe luego del prensado) la temperatura de la madera en la línea de cola no debe ser menor que 18°C y con una humedad relativa del aire mayor a 30%. En esta fase la madera permaneció en grandes galpones abiertos, lo que supone que en épocas invernales las condiciones establecidas no se cumplieran adecuadamente.

Además, durante el proceso de fraguado, se debe dejar reposar las piezas sin movimientos bruscos o que comprometan la unión de adhesivo-láminas.

Corte de extremos y cepillado de las piezas

Una vez fabricadas las vigas, éstas fueron cortadas por las testas para dejarlas a la longitud requerida. Por otra parte, el encolado deja una superficie lateral en la viga con restos de adhesivo, por lo que se cepillan las piezas luego de la estabilización del encolado.

La Figura 4.17 muestra los restos de adhesivo tras el prensado de las vigas, se observa también la desigualdad de la longitud de las láminas en los extremos de las mismas.

El desbordamiento del adhesivo en la línea de encolado tras el prensado es buena señal, indicativo de que la cantidad de adhesivo aplicada fue suficiente.



Figura 4.17: Apariencia de las vigas tras el prensado.

Almacenaje

El almacenaje se realiza en galpones que permiten el pasaje de aire libre, evitando someter las piezas a esfuerzos desmedidos, al igual que durante su transporte.

4.4. Ensayos y obtención de datos

4.4.1. Esquema general de los ensayos

La Figura 4.18 representa el proceso general llevado a cabo desde la recepción de la madera hasta el análisis de los resultados obtenidos, indicando el orden de cada uno de los diferentes ensayos, los cuales se encuentran detallados en apartados posteriores.

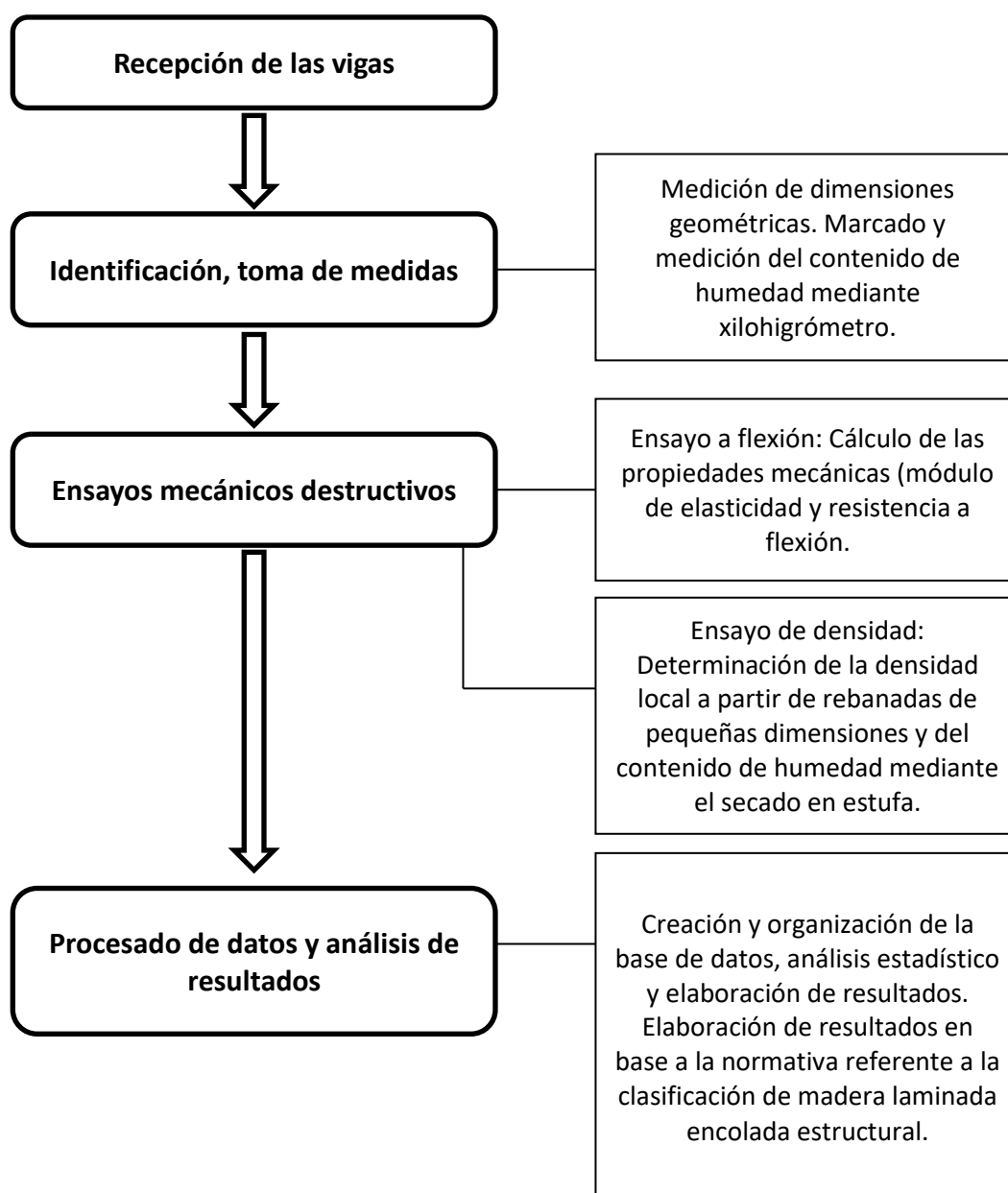


Figura 4.18: Esquema general de los ensayos.

4.4.2. Equipos utilizados

Xilohigrómetro

El contenido de humedad al momento de realizar los ensayos fue determinado mediante un xilohigrómetro Gann RTU 600 (Figura 4.19). Este instrumento permite determinar el contenido de humedad en materiales como la madera con valores inferiores al 27%, basado en las variaciones de la resistencia eléctrica que experimentan los mismos al cambiar su contenido de humedad.



Figura 4.19: Xilohigrómetro RTU 600 (Gann).

Instrumentos de medición

Para la medición de las dimensiones geométricas, punto de apoyo en banco de ensayo y punto de apoyo de LVDT para medición de flechas, fueron empleadas escuadras graduadas y cinta métrica.

Banco de ensayos

El ensayo mecánico de flexión de cuatro puntos (EN 408:2011) para la determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a flexión, se llevó a cabo en un pórtico de ensayos del Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería, como lo muestra la Figura 4.20. El mismo transmite la fuerza de carga, que es medida mediante un dinamómetro, a una barra supuesta infinitamente rígida (indeformable) que se encuentra apoyada en dos tornillos (apoyos) que descansan sobre la viga a ensayar. La velocidad de introducción de carga es constante.

Las vigas apoyan en el banco dejando una luz libre de 4,20 m de longitud.



Figura 4.20: Banco de ensayos utilizado para ensayo a flexión de vigas.

LVDT

Son transductores que “transforman” un desplazamiento lineal en una diferencia de potencial. Cada LVDT tiene una constante k en mm/volt que se utiliza para pasar del valor en Volt que brinda el instrumento a medida de longitud que es lo que intereso. El nombre de este transductor corresponde a las iniciales de su nombre en inglés: *Linear Variable Differential Transformer*.

Estos instrumentos se colocaron a ambos lados de la viga y se utilizaron para la medición de la flecha en el centro del vano y en la fibra media de estas. (Figura 4.21)



Figura 4.21: LVDT utilizado para la medición del desplazamiento de las fibras en la sección media de las vigas.

Estufa de secado

El cálculo del contenido de humedad fue realizado mediante el secado en estufa, este procedimiento se llevó a cabo en el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU).

4.4.3. Ensayos realizados y obtención de datos

Para la realización de los ensayos se utiliza la norma EN 408:2011, enmarcada dentro del contexto normativo presentado en el Capítulo 3 del presente trabajo. Esta norma europea establece métodos para la determinación de las siguientes propiedades de la madera laminada encolada: módulo de elasticidad en flexión y resistencia a flexión, así como también la determinación de las dimensiones, la humedad y la densidad de las probetas. Luego, también establece los métodos necesarios para otra gama de ensayos relevantes, pero que no tendrán participación en este documento.

Ensayo mecánico a flexión de cuatro puntos

La flexión se origina por un momento flector que produce en la sección de la pieza tensiones de compresión y tracción paralelas a la fibra que tienen sus valores máximos en las fibras extremas y que son nulas en la fibra neutra. Como el comportamiento mecánico de estas dos propiedades es diferente, en madera es preciso hablar de una resistencia a flexión. (Argüelles, 1996),

Módulo de elasticidad

La configuración del ensayo para la determinación del módulo de elasticidad se representa en la Figura 4.22:

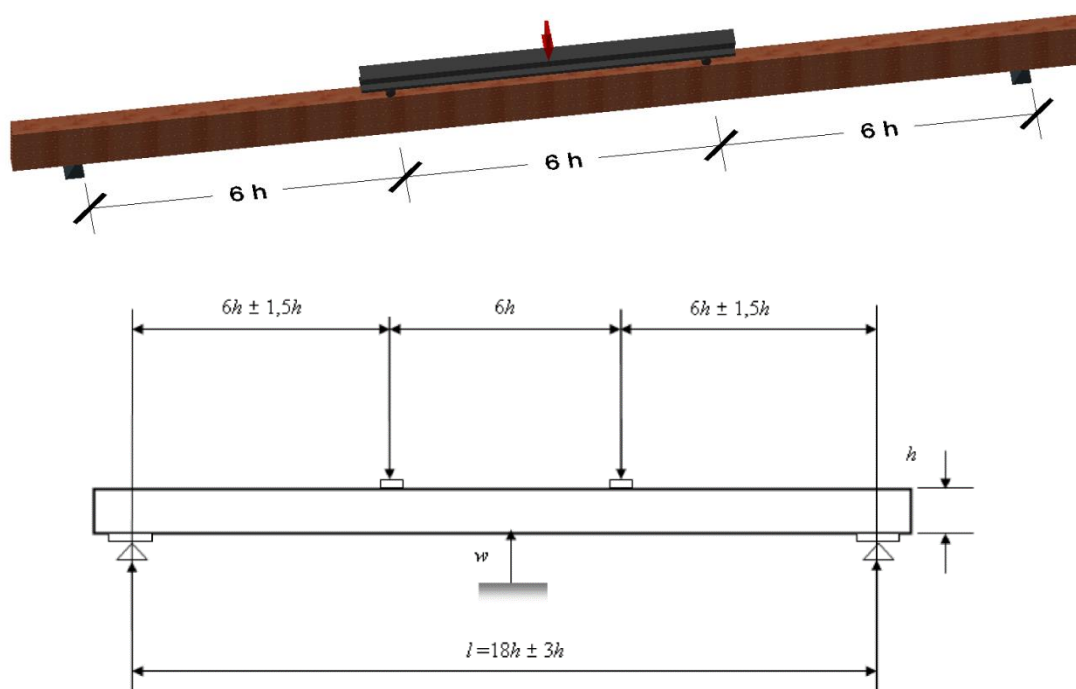


Figura 4.22: Configuración del ensayo para la determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a flexión (EN 408:2011).

La probeta fue cargada en flexión sobre dos puntos simétricos separados una distancia igual a 6 veces la altura de la sección ($6h$), con una luz igual a 18 veces la altura de la sección. La carga se aplicó a velocidad constante, siempre menor a $0,003h$ mm/s.

Luego, para el cálculo del módulo de elasticidad (E_0) se utilizó la siguiente fórmula:

$$E_0 = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}$$

Donde,

a es la distancia entre un punto de carga y el apoyo más cercano, en mm.

l, h y b son la luz de flexión, la altura y el ancho de la sección respectivamente, en mm.

$F_2 - F_1$ es el incremento de carga sobre la línea de regresión, con un coeficiente de regresión de 0,99 o mejor, en N.

$w_2 - w_1$ es el incremento del desplazamiento correspondiente al tramo $F_2 - F_1$, en mm.

G es el módulo de elasticidad transversal medio, en N/mm^2 . Como en el esquema presentado se asume la presencia de corte, este valor se aproxima por $G = E_0/16$, según EN 384:2016. Con la consideración anterior se llega a un módulo de elasticidad igual a;

$$E_0 = \frac{(3al^2 - 4a^3) + 38,4ah^2}{4bh \left(\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right)}$$

La ecuación anterior se obtiene al despejar el módulo de elasticidad a partir las ecuaciones de viga de la teoría de Timoshenko, que considera el efecto de la fuerza cortante en la deformación. La deducción de la ecuación a partir de la teoría de viga de Timoshenko se presenta en el Anexo del documento.

Previo a la realización del ensayo mecánico se midieron las dimensiones de las secciones de las probetas y su contenido de humedad (Tabla 4.4).

Tabla 4.4: Parámetros de la viga ensayada.

Ancho de la probeta b (mm)
Alto de la probeta h (mm)
Largo de la probeta L (mm)
Contenido de humedad CH (%)

Además, fue relevante para el análisis posterior de los resultados anotar los parámetros de los ensayos correspondientes a cada viga (Tabla 4.5).

Tabla 4.5: Parámetros del ensayo

Luz de ensayo l (mm)
Distancia entre carga y apoyo a (mm)

Se midieron desplazamientos obtenidos a ambos lados de la viga mediante la utilización de LVDT así como también la fuerza aplicada, medida con un dinamómetro en función del tiempo.

La medición del desplazamiento (w) fue realizada en el centro de la luz y sobre las fibras medias en ambos lados de la viga, en un tramo comprendido entre $0,1 F_{m\acute{a}x,est}$ y $0,4 F_{m\acute{a}x,est}$ siendo $F_{m\acute{a}x,est}$ la carga máxima estimada del material ensayado, obtenida de ensayos preliminares. Los dispositivos LVDT, son retirados al alcanzarse una carga superior a $0,4 F_{m\acute{a}x,est}$. Una vez retirados se continuó cargando la probeta hasta su rotura.

Se toman por lo tanto, para cada viga ensayada los registros presentados en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Valores tomados durante la realización del ensayo

Tiempo (s)	Fuerza (kN)	Flecha lado 1 (mm)	Flecha lado 2 (mm)
t	$F(t)$	$w_1(t)$	$w_2(t)$

Luego, con los desplazamientos a ambos lados de la viga, se obtuvo el valor medio para cada tiempo;

$$w_{medio}(t) = \frac{w_1(t) + w_2(t)}{2}$$

Se determinan después $F_{10\%} = 0,1 F_{m\acute{a}x}$ y $F_{40\%} = 0,4 F_{m\acute{a}x}$ así como los desplazamientos $w_{10\%}$ y $w_{40\%}$ asociados a $F_{10\%}$ y $F_{40\%}$ respectivamente, esta

porción del gráfico está contenida en el tramo elástico como se muestra en el gráfico de una de las vigas ensayadas presente en la Figura 4.23.

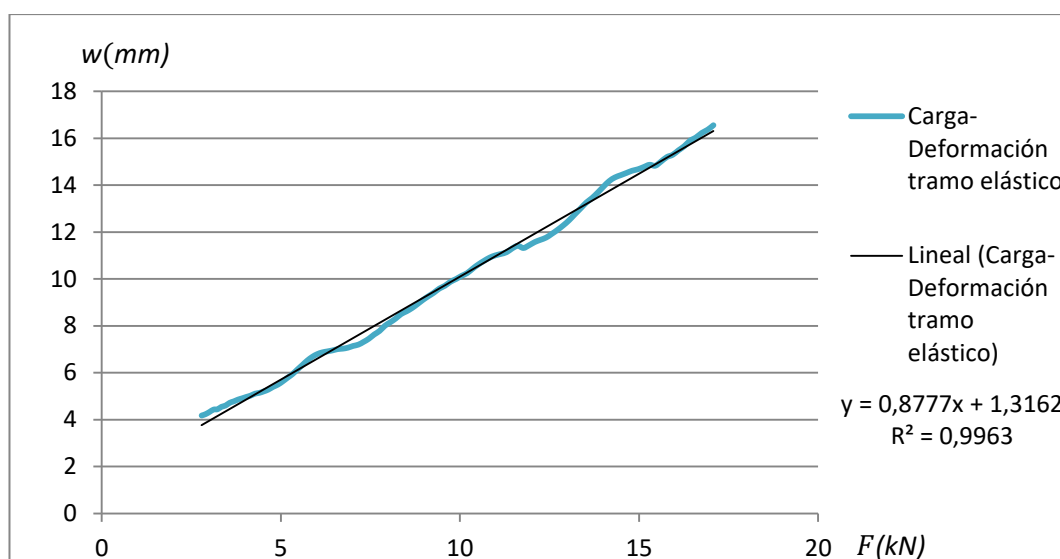


Figura 4.23: Gráfico de desplazamiento (mm) en función de la fuerza (kN) aplicada.

En el gráfico de la Figura 4.23 se observa en azul la curva carga – desplazamiento en el tramo elástico del ensayo, así como la línea de regresión realizada para aproximar el mismo. El coeficiente de regresión lineal debe ser de por lo menos 0,99 para todos los gráficos establecidos.

El módulo de elasticidad (E_0) fue corregido al contenido de humedad de referencia, aumentando un 1% por cada variación del 1% de contenido de humedad por encima de 12% y viceversa. Se definió así la variable módulo de elasticidad corregido (E_{12})

Esto quiere decir,

$$E_{12} = \frac{E_0}{100} (CH(\%) - 12\%) + E_0$$

Resistencia a flexión

La configuración del ensayo para la determinación de la resistencia a flexión es igual a la correspondiente al ensayo de determinación del módulo de elasticidad, midiendo la carga aplicada hasta la rotura de la viga.

La resistencia a flexión f_m se calculó según la ecuación:

$$f_m = \frac{3F_{m\acute{a}x}a}{bh^2}$$

Donde,

a es la distancia entre un punto de carga y el apoyo más cercano, en mm

$F_{m\acute{a}x}$ es la carga máxima de flexión, en N

h y b son la altura y el ancho de la sección, respectivamente, en mm.

Esta ecuación asume que la rotura de la pieza siempre se produce dentro del tercio central, sobrestimando el valor de la resistencia a flexión de las piezas cuyo punto de rotura se produjese en un lugar fuera de éste (tramo de máximo momento flector).

Fue necesario generar un gráfico de fuerza en función del tiempo para observar con claridad dicho fenómeno. Un ejemplo de ello se puede ver en la Figura 4.24, la misma muestra los valores obtenidos para una de las vigas ensayadas.

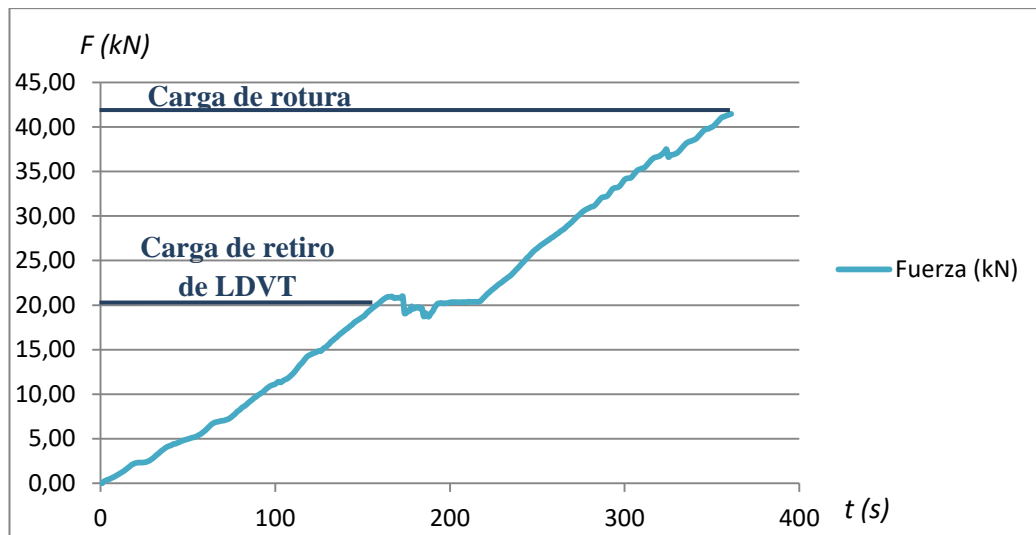


Figura 4.24: Gráfico de fuerza (kN) en función del tiempo (s).

Determinación de la densidad

Luego del ensayo mecánico, la densidad fue calculada a partir de las rebanadas libres de defectos extraídas de las piezas lo más cerca posible a la sección de rotura.

Se miden, para la determinación de este parámetro dos variables, uno que es llamada densidad de la rebanada (ρ_{reban}) que es la densidad de la rebanada con un contenido de humedad en el momento del ensayo (CH_{est}), y otra que indica la densidad corregida a la humedad de referencia de 12% ($\rho_{reban,12}$).

Luego la densidad de la muestra fue calculada con la siguiente ecuación;

$$\rho_{reban} = \frac{m_H}{V_H}$$

Donde;

m_H es la masa de la rebanada con un contenido de humedad CH

V_H es el volumen de la rebanada con un contenido de humedad CH

El contenido de humedad en el momento del ensayo de densidad (CH_{est}) fue determinado mediante secado en estufa según lo establecido en la norma EN 13183-1:2006. La misma se calculó como;

$$CH_{est} = \frac{m_H - m_o}{m_o} \times 100$$

Donde,

m_o es la masa de la muestra anhidra.

La corrección de los valores de densidad fue realizada según lo establecido en la norma EN 384:2016, reduciendo su valor un 0,5% por cada 1% de contenido de humedad de la madera por encima del 12% y viceversa.

4.5. Procesamiento de datos

4.5.1. Análisis estadístico

Para la obtención de los valores característicos de resistencia a flexión, densidad y módulo de elasticidad, la norma EN 14358:2016 determina que los datos obtenidos se modelan mediante distribuciones normal y logarítmica normal.

Se buscó mostrar que dichas suposiciones son coherentes y para ello se realizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (K-S).

Esta prueba se utiliza para probar una hipótesis acerca de la distribución de la población, de la cual se extrae una variable aleatoria. La hipótesis nula para la prueba de bondad de ajuste es que la distribución de la población es una distribución normal frente a la alternativa de que los datos no se ajustan a la distribución dada.

Lo anterior refiere a;

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal

Para esta prueba se considera lo siguiente:

Se tiene una muestra de variables aleatorias $X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ y se define la función de distribución empírica de la muestra:

$$F_e(x_i) = \begin{cases} 0 & X < x_{(1)} \\ \frac{i-1}{n} & x_{(i-1)} \leq X < x_{(i)} \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \\ 1 & X \geq x_{(n)} \end{cases}$$

Donde $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$ constituyen la muestra ordenada de menor a mayor. El estadístico de la prueba para este test de bondad de ajuste se basa en la mayor distancia entre la distribución empírica de datos $F_e(x)$ y la distribución teórica que suponemos para la población $F(x)$, entonces se define:

$$D = \max|F_e(x) - F(x)|$$

Luego, el criterio para la toma de la decisión entre las dos hipótesis será de la forma:

$$\text{Si } D \leq D_\alpha \rightarrow \text{Aceptar } H_0$$

$$\text{Si } D > D_\alpha \rightarrow \text{Rechazar } H_0$$

Donde D_α se elige de tal manera que:

$$\begin{aligned} &P(\text{Rechazar } H_0 \text{ tal que } H_0 \text{ sea cierta}) = \\ &= P(D < D_\alpha \text{ tal que los datos siguen la distribución normal}) \end{aligned}$$

Siendo α el nivel de significación del contraste.

D_α es un valor que se encuentra tabulado dependiendo del número de ensayos y el nivel de significación (α).

4.5.2. Caracterización estructural

Determinación de las propiedades características de una muestra partiendo de los resultados de las vigas ensayadas (norma UNE-EN 14358:2016).

A continuación se presenta la metodología de cálculo de los valores resistentes según la norma UNE-EN 14358:2016 partiendo de los resultados de los ensayos realizados en el marco de la norma EN 408:2011.

La norma en cuestión indica métodos estadísticos a través de los cuales determinar valores característicos, partiendo de una muestra procedente de una

población de referencia claramente definida de productos derivados de la madera como es la madera laminada encolada entre otros.

A través de la metodología que se expone a continuación se busca determinar el valor característico de una cierta propiedad o resistencia del material con un nivel de confianza $\alpha = 75 \%$.

El valor α puede entenderse como la probabilidad de que el valor característico “real” sea mayor que la estimación que se realiza por el presente procedimiento.

Resulta importante mencionar que, para los valores de resistencia a flexión paralela a la fibra y densidad se calculará el valor característico al quinto percentil, por otra parte, para el módulo de elasticidad se halla el valor característico medio.

Determinación de los percentiles del 5% y del 95%

El valor característico m_k de un parámetro m modelizado en forma de variable aleatoria se define como el percentil del orden $p = 5\%$ en la función de distribución de m correspondiente a una serie de ensayos supuestamente infinita (Figura 4.25).

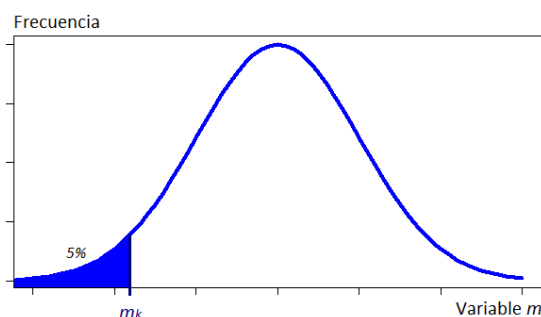


Figura 4.25: Valor del 5% percentil en una distribución normal.

Para la determinación paramétrica se cuenta con n valores de ensayo y procedentes de una población estadísticamente homogénea.

Los n valores de ensayo que constituyen la muestra se designan como m_1, m_2, \dots, m_n y se supone que tienen una distribución logarítmica normal para el cálculo de la resistencia a flexión y normal para el cálculo de la densidad.

Valor medio \bar{m} y desviación típica s_m

Para determinar la resistencia característica a flexión paralela a la fibra (f_k) se supone una distribución logarítmica normal de los valores obtenidos con los ensayos debiéndose utilizar las fórmulas que se muestran a continuación:

Para el valor medio:

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Ln}(m_i)$$

Para la desviación estándar:

$$s_m = \text{máx} \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{Ln}(m_i) - \bar{m})^2} ; 0,05 \right\}$$

Para determinar el valor característico de la densidad de la muestra (ρ_k) se supone una distribución normal de los valores obtenidos mediante ensayos utilizándose por lo tanto las fórmulas que se muestran a continuación:

Para el valor medio:

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$$

Para la desviación estándar:

$$s_m = \text{máx} \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} ; 0,05 \bar{m} \right\}$$

Valor característico de la muestra

Finalmente el valor característico de la muestra se determina como se expone a continuación.

Para la resistencia característica a flexión f_{kt} (distribución logarítmica normal):

$$m_k = e^{\bar{m} - k_s(n)s_m}$$

Para la densidad de la muestra (ρ_k) (distribución normal):

$$m_k = \bar{m} - k_s(n)s_m$$

En ambas ecuaciones $k_s(n)$ es un coeficiente que para las propiedades de resistencia con $p = 5\%$ y $\alpha = 75\%$ se puede determinar a través de la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Coeficiente $k_s(n)$ para las propiedades de resistencia según EN 14358:2016

<i>N° de probetas n</i>	<i>Coeficiente k_s</i>
3	3,15
5	2,46
10	2,10
15	1,99
20	1,93
30	1,87
50	1,81
100	1,73
500	1,69
∞	1,64

Determinación de los valores característicos medios

El valor característico medio, m_{medio} , de un parámetro m modelizado en forma de variable aleatoria se define como el valor medio de la función de distribución de m que, de igual forma que como se trabajó para la resistencia a flexión paralela a la fibra y para la densidad, corresponde a una serie de ensayos supuestamente infinita. La mencionada función de distribución puede tener tanto una distribución normal como una logarítmica normal.

Para la determinación paramétrica se cuenta con n valores de ensayo procedentes de una población estadísticamente homogénea, los mismos constituyen la muestra y se designan como m_1, m_2, \dots, m_n .

El procedimiento que se detalla a continuación será utilizado para determinar el valor característico medio del módulo de elasticidad paralelo a la fibra ($E_{0,m}$)

Valor medio \bar{m} y desviación típica s_m

El valor medio se determina de la siguiente manera:

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$$

Para la desviación estándar se tiene:

$$s_m = \text{máx} \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} ; 0,05 \bar{m} \right\}$$

Valor característico de la muestra

Para las propiedades de rigidez, el valor característico medio se determina como el valor medio de la muestra (\bar{m}) tal y como se indica en la fórmula anterior, esto será lo realizado para determinar el valor característico de las vigas ensayadas en este trabajo de investigación.

Como en este trabajo no se utilizan intervalos de confianza se tiene que $k_s(n) = 0$ como indica la norma.

Por lo tanto,

$$m_k = \bar{m}$$

Aclaraciones según la norma EN 14080:2013

El valor característico a flexión para la MLE es válido para vigas con un canto $h = 600 \text{ mm}$ y un grosor de lámina $t = 40 \text{ mm}$. Si el grosor de las láminas se encuentra entre $40 \text{ mm} < t < 45 \text{ mm}$ no será necesario efectuar ninguna corrección, si t es menor a 40 mm entonces la resistencia a flexión debe corregirse multiplicando por el factor k ;

$$k = \text{mín} \left\{ \left(\frac{40}{t \text{ (mm)}} \right)^{0,1} \right. \\ \left. 1,05 \right.$$

Determinación de las propiedades características de una población partiendo de los resultados de las muestras estudiadas (norma EN 384:2016)

Los valores característicos de las propiedades de la madera se penalizan, no solo para cada muestra, sino también en función de la cantidad total de muestras que se ensayaron, esto es, de la población.

Para lo anterior, se utilizó el procedimiento detallado en la norma EN 384:2016 que, si bien está indicado para madera aserrada, aplica al análisis probabilístico realizado para la MLE.

Consideraciones para las propiedades de resistencia

El valor característico de la resistencia f_k se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$f_k = \bar{f}_{05} k_s k_v$$

Donde,

El valor de $\overline{f_{05}}$ se puede obtener como se muestra a continuación:

$$\overline{f_{05}} = \min \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{n^{\circ} \text{muestr}} f_{05,j} n_j}{\sum_{j=1}^{n^{\circ} \text{muestr}} n_j} ; 1,2 \min_n \{f_{05,j}\} \right\}$$

Con,

$f_{05,j}$ es el valor característico de la resistencia de la muestra j

n_j es el número de probetas de la muestra j

k_s es un factor de corrección que depende del número y tamaño de las muestras y se puede obtener a través del gráfico de la Figura 4.26:

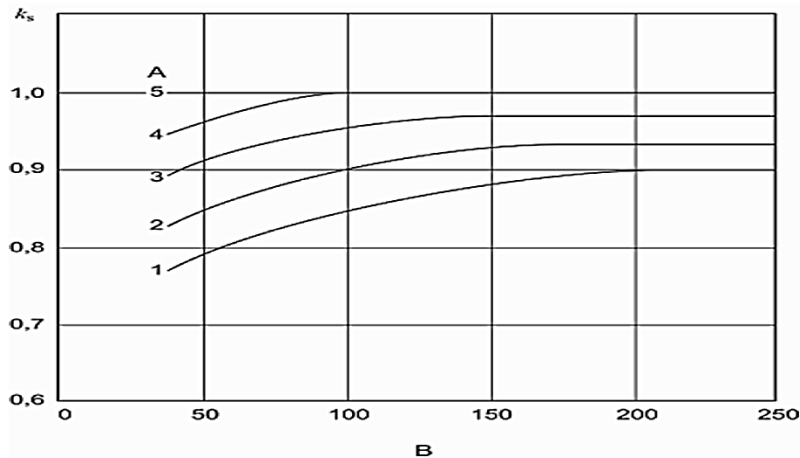


Figura 4.26: Gráfico para determinar el factor de corrección k_s según EN 384:2016.

En el gráfico, A es en número de muestras, mientras que B es el número de probetas de la muestra más pequeña.

k_v es un factor que tiene en cuenta la menor variabilidad de los valores de f_{05} entre las muestras en el caso de clasificación mecánica respecto a la clasificación visual.

Para las resistencias a tracción y compresión en el sentido paralelo a la fibra, $k_v = 1$.

Consideraciones para el módulo de elasticidad

El valor característico del módulo de elasticidad medio $E_{0,medio}$ se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_{0,medio} = \frac{\sum_{j=1}^{n^{\circ} \text{ muestr}} E_{0,m,j} n_j}{\sum_{j=1}^{n^{\circ} \text{ muestr}} n_j}$$

Donde;

$E_{0,m,j}$ es el valor medio del módulo de elasticidad de la muestra j

n_j es el número de probetas de la muestra j

Consideraciones para la densidad

La densidad característica ρ_k se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\rho_k = \frac{\sum_{j=1}^{n^{\circ} \text{ muestr}} \rho_{05,j} n_j}{\sum_{j=1}^{n^{\circ} \text{ muestr}} n_j}$$

Donde,

$\rho_{05,j}$ es el valor característico al 5° percentil de la densidad de la muestra j

n_j es el número de probetas de la muestra j

Capítulo 5:

Resultados y discusión

5.1. Valores obtenidos

Tabla 5.1: Valores individuales de las vigas ensayadas.

<i>Viga n^o</i>	<i>E₀</i> (kN/mm ²)	<i>f</i> (N/mm ²)	<i>ρ</i> (kg/m ³)	<i>Tipo de rotura</i>
1	13,81	49,89	532,51	Por madera
2	14,14	38,01	539,69	Por adhesivo
3	12,48	25,39	468,39	Por adhesivo
4	14,11	28,05	507,60	Por madera
5	12,54	29,97	491,34	Por madera
6	15,36	32,03	500,46	Por adhesivo
7	11,30	53,21	498,01	Por madera
8	12,37	41,02	476,74	Por adhesivo
9	12,05	42,63	508,90	Por adhesivo
10	13,05	40,03	533,09	Por madera
11	13,73	44,25	503,97	Por adhesivo
12	13,84	43,13	536,28	Por adhesivo
13	12,93	38,73	497,13	Por madera
14	16,29	48,15	513,72	Por madera
15	15,35	51,33	485,95	Por adhesivo
16	14,31	48,04	515,93	Por madera
17	12,73	39,4	517,00	Por adhesivo
18	14,44	49,06	503,61	Por adhesivo
19	13,29	40,41	477,75	Por madera
20	16,05	55,05	491,31	Por madera
21	15,80	54,30	538,35	Por madera
22	11,77	41,10	487,34	Por adhesivo
23	13,06	41,74	470,73	Por madera
24	11,12	38,14	517,60	Por madera
25	14,34	36,05	513,52	Por madera
26	15,01	64,01	450,14	Por adhesivo
27	12,65	32,12	526,82	Por madera
28	18,62	27,38	513,04	Por madera
29	26,59	76,07	508,00	Por adhesivo
30	25,43	37,53	502,75	Por madera
31	11,91	42,49	520,70	Por madera
32	12,47	38,24	525,46	Por madera
33	15,92	33,37	515,91	Por madera

Val. Medios	14,51	42,43	505,75
Val. Mínimo	11,12	25,39	450,14
Val. Máximo	26,59	76,07	539,69

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos de las 33 vigas de MLE ensayadas mediante los procedimientos descritos en el Capítulo 4.

Como un primer análisis de la muestra ensayada se observa que el menor valor de resistencia a flexión obtenido es $25,39 \text{ N/mm}^2$ mientras que el máximo valor es 3 veces mayor, $76,08 \text{ N/mm}^2$, con esto se puede notar de forma muy sencilla lo dispersas que pueden llegar a ser las magnitudes de las resistencias halladas a través del ensayo realizado. La gran variación entre los valores obtenidos se explica por la naturaleza heterogénea de la madera, su anisotropía e higroscopicidad y un proceso de fabricación que como se mencionó en Uruguay no está estandarizado.

5.1.1. Distribución de los resultados

En la Figura 5.1 se muestra el histograma y la curva de Gauss para los valores obtenidos de módulo de elasticidad, resistencia a flexión y densidad.

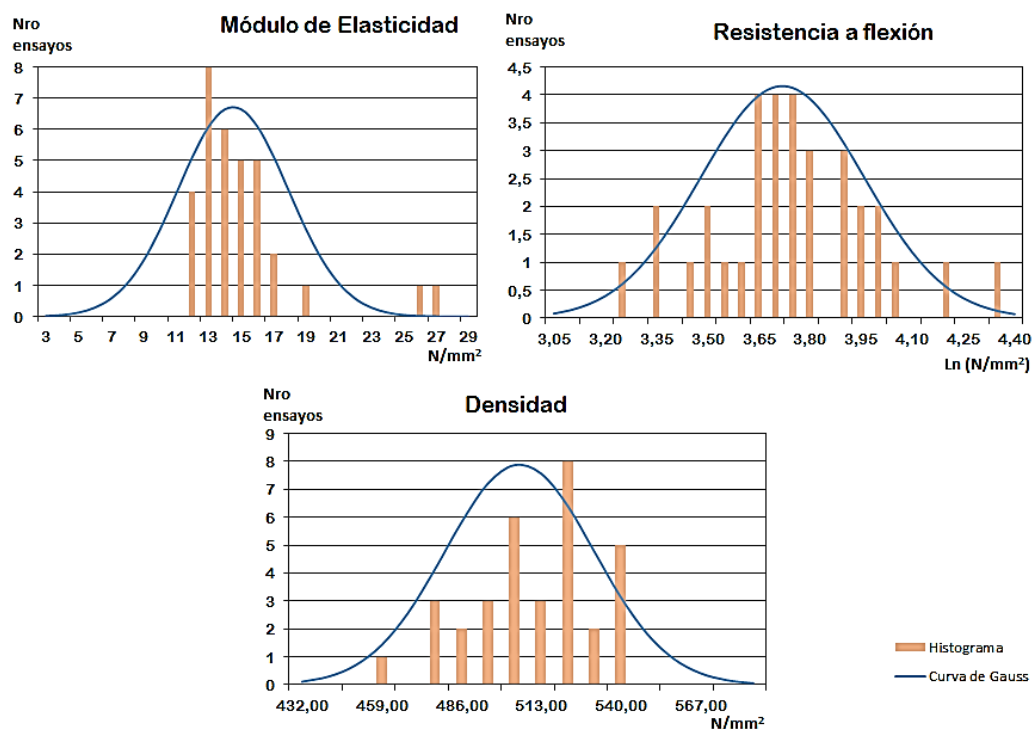


Figura 5.1: Histograma y curva de Gauss.

Para el caso en que los datos se asemejaron a una distribución logarítmica normal, los logaritmos de los valores obtenidos fueron los que se modelaron como una distribución normal.

En la Figura 5.1 se observa que no es trivial identificar si los valores se ajustan a la función de distribución normal correspondiente, es por esto que se optó por realizar un test de bondad de ajuste según Kolmogorov-Smirnov.

En la Figura 5.2 se muestran superpuestos los gráficos de función empírica ($F_e(x)$) y función teórica ($F(x)$) utilizados para realizar el test de bondad de ajuste. Allí se muestran las diferencias entre ambas funciones. La diferencia máxima es la que compone el valor D requerido para comparar con el valor estadístico con grado de significación α .

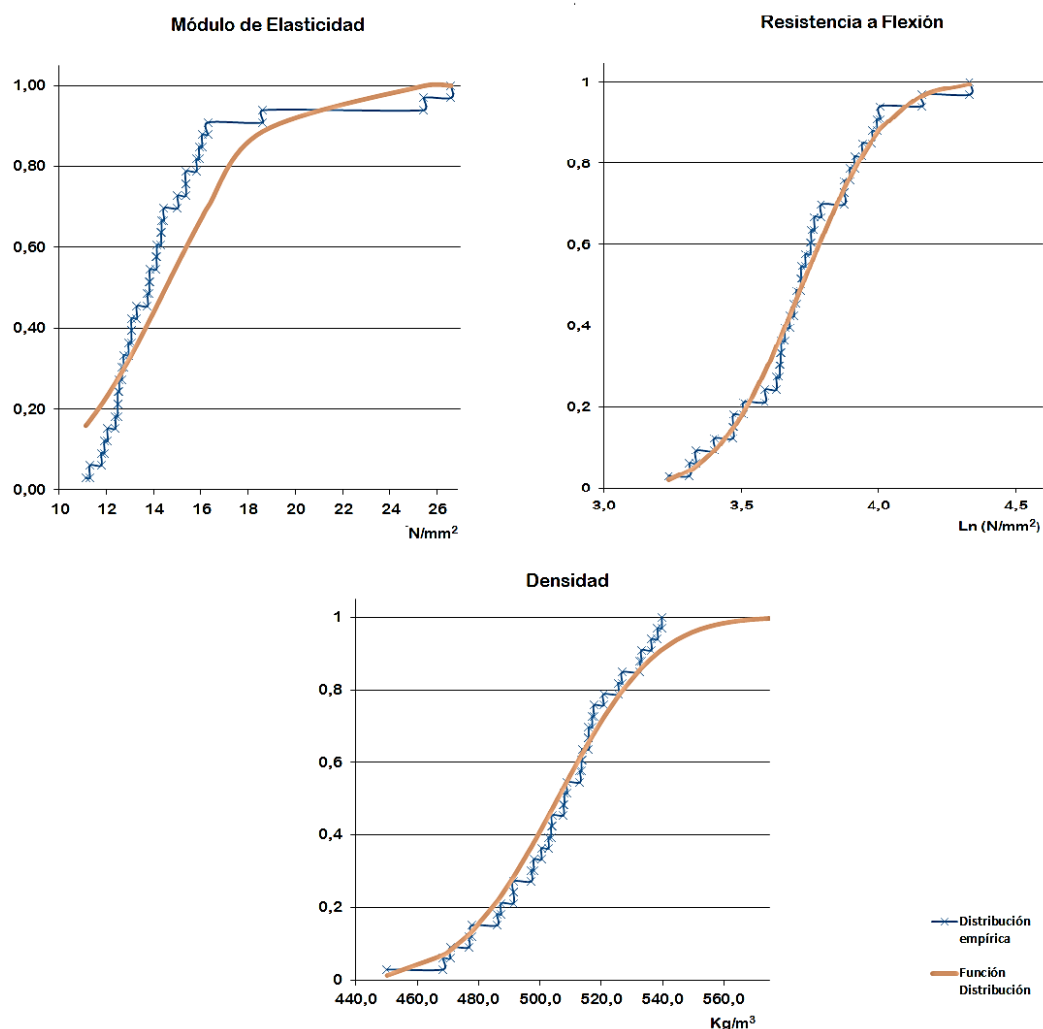


Figura 5.2: Gráficos de distribución empírica (según K-S) y función de distribución Gaussiana.

La Tabla 5.2 muestra la media y la desviación estándar que constituyen los parámetros normales y los valores de D y D_α como parámetros de Kolmogorov-Smirnov para las variables de módulo de elasticidad, resistencia a flexión y densidad.

Se tomó D_α teniendo en cuenta que $n = 33$ y el nivel de significación para este caso se toma como $\alpha = 0,05$ (Perera, 2011).

Tabla 5.2: Parámetros utilizados para el test de Kolmogorov-Smirnov.

		<i>Módulo de Elasticidad</i>	<i>Resistencia a Flexión (Ln(f))</i>	<i>Densidad</i>
<i>Parámetros normales</i>	<i>Media</i>	14,51 N/mm^2	3,72 $Ln(N/mm^2)$	505,75 kg/m^3
	<i>Desviación Estándar</i>	3,39 N/mm^2	0,24 $Ln(N/mm^2)$	25,29 kg/m^3
<i>Parámetros K-S</i>	<i>D</i>	0,209	0,104	0,094
	<i>D_(α=0,05)</i>	0,23	0,23	0,23
	<i>¿Cumple D < D_(α=0,05)?</i>	Sí	Sí	Sí

Las pruebas de contraste de normalidad permiten aceptar que todas las variables analizadas se ajustan a una distribución normal.

5.2. Análisis de valores medios y tipo de falla

La Tabla 5.3, resume los valores medios obtenidos en Uruguay y valores medios de resistencia a flexión y módulo de elasticidad para una muestra de MLE de *Eucalyptus grandis* brasilero (dos Anjos & Alves, 2006)

Tabla 5.3: Valores resistentes derivados de estudios de MLE uruguayo y brasilero.

	<i>MLE de E. grandis uruguayo</i>	<i>MLE de E. grandis brasilero (dos Anjos & Alves, 2006)</i>
Resistencia a la flexión (N/mm^2)	42,43	33,99
Módulo de elasticidad (N/mm^2)	14.511	18.660

Los valores de resistencia a flexión de la MLE uruguaya son mayores que los obtenidos para la MLE brasilera pero los resultados del módulo de elasticidad son un 15% menores. A falta de información sobre el proceso de selección de la madera, proceso constructivo de las vigas y tipo de ensayo realizado no es posible establecer un motivo claro a tales diferencias.

Por otra parte, si se observa únicamente la madera uruguaya se tienen tres tipos de roturas principales, por madera, por adhesivo y una falla mixta madera-adhesivo.

En la primera la pieza rompe totalmente por la madera no existiendo descolado entre los trozos que componen la viga de MLE. Por otra parte, cuando la rotura es por adhesivo, se observa una clara pérdida de adherencia en la madera que conforman los *fingers* que lleva a la falla de la pieza. En la rotura mixta una parte de la unión madera-adhesivo pierde adherencia mientras que otra parte rompe a través de la madera (Figura 5.3.). En este trabajo la falla mixta fue considerada como falla por adhesivo.



Figura 5.3: A la izquierda-arriba rotura mixta, a la derecha-arriba rotura por madera y abajo rotura por adhesivo.

De las 33 piezas ensayadas, 13 rompieron por causa de problemas con el adhesivo en las uniones (*fingers* o láminas) lo que significa un alto porcentaje (39%), las 20 restantes rompieron por la madera (61%). Sabiendo que la resistencia del adhesivo es mayor que la de la madera, lo esperado es que la rotura siempre se dé por esta última. Una posible interpretación de esto, es que el proceso de fabricación de las vigas no sea el adecuado. Es de vital importancia tener en cuenta este aspecto para

que el uso del adhesivo sea el óptimo y las fallas dependan exclusivamente de la madera.

En la Tabla 5.4 se realiza un promedio de las resistencias de las vigas que rompieron por ambos tipos de falla considerados.

Tabla 5.4: Número de vigas que rompieron por adhesivo y por madera acompañados de su resistencia media correspondiente.

<i>Tipo de rotura</i>	<i>n</i>	<i>f_{medio} (N/mm²)</i>
Por madera	20	40,64
Por adhesivo	13	45,18

El valor de la resistencia de aquellas vigas que rompieron por adhesivo es un 10% mayor que el de aquellas que rompieron por la madera.

5.3. Propiedades características de la muestra

En la Tabla 5.5 se muestran los valores característicos de las vigas ensayadas junto con los valores utilizados para su obtención.

Tabla 5.5: Datos utilizados para obtener valores característicos de la población.

<i>Resistencia a flexión</i>		<i>Densidad</i>		<i>Módulo de Elasticidad</i>	
\bar{f} (N/mm ²)	42,43	$\bar{\rho}$ (kg/m ³)	505,75	\bar{E} (N/mm ²)	14511,17
s_f	0,24	s_ρ (N/mm ²)	25,29	s_E	3,39
k_s	1,87	k_s	1,87	k_s	0,00
<i>COV</i> (%)	6,45	<i>COV</i> (%)	5,00	<i>COV</i> (%)	23,39
f_{05} (N/mm ²)	27,61	ρ_{05} (kg/m ³)	458,46	$E_{0,m}$ (N/mm ²)	14511,17

5.3.1. Valores de madera aserrada de *E. grandis*

Se muestran en la Tabla 5.6 resultados parciales del proyecto de INNOVAGRO con valores característicos de resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad obtenidos para tablas de madera aserrada de *E. grandis*.

Tabla 5.6: Valores característicos de tablas de madera aserrada de *E. grandis* según resultados parciales de proyecto INNOVAGRO.

<i>Muestra</i>	<i>n</i>	<i>f₀₅ (N/mm²)</i>	<i>E_{0,m} (N/mm²)</i>	<i>ρ₀₅ (kg/m³)</i>
1	30	31,88	12271	429

Estos valores se pueden comparar con los resultados obtenidos para vigas de MLE de *E. grandis* que fueron presentados en la Tabla 5.5.

Se observa que la densidad de la madera aserrada es menor que la de la MLE, lo anterior se puede explicar por la presencia del adhesivo en esta última cuyo peso específico es más del doble que el de la madera en sí.

Se observa que, a pesar de haber sometido la MLE a un proceso de elaboración que sana la madera e intenta darle valor agregado, la resistencia a flexión obtenida es menor que la hallada para la madera aserrada de la misma especie. Sin embargo, en lo que respecta al módulo de elasticidad se observa un leve aumento en las vigas de MLE, lo que las haría menos deformables.

5.3.2. Valores característicos de MLE argentina

En la Tabla 5.7 se presentan los valores característicos de los parámetros resistentes de las vigas de MLE ensayadas en este trabajo conjuntamente con las ensayadas en Argentina por Piter (2006).

En cuanto a los valores del país lindero cabe mencionar que, las vigas nombradas como GL1 fueron realizadas con tablas clasificadas visualmente como Clase 1 mientras que las GL2 fueron fabricadas con tablas clasificadas visualmente como Clase 2 según la norma IRAM 9662-2:2006.

Tabla 5.7: Valores resistentes derivados de estudios de MLE uruguay y argentina.

	<i>MLE de E. grandis Uruguay*</i>	<i>Piter (2006)</i>	
		<i>MLE GL 1</i>	<i>MLE GL 2</i>
<i>Flexión N/mm²</i>	27,61	28,8	23,3
<i>Elasticidad N/mm²</i>	14.511	18.000	18.100
<i>Densidad Kg/m³</i>	458	510	540

*Valores de la muestra 2 ensayada.

Los resultados de las vigas ensayadas en esta tesina se comparan con los de las vigas nombradas como GL2, de esta forma se asegura que todas las piezas comparadas fueron realizadas con tablas con una misma clasificación visual.

Lo primero que se observa es una resistencia a la flexión 16% mayor en las vigas realizadas en Uruguay. Al tratarse de un material con una alta dispersión en los resultados, es difícil establecer un motivo particular por el cual se produce esta diferencia.

Sin embargo, teniendo en cuenta que la rotura de las vigas generalmente se da en las zonas de acumulación de tensiones ocasionadas en los alrededores de las uniones dentadas, se podría intuir que la variabilidad entre las resistencias de ambos estudios se debe a la diferencia en el tamaño de los *fingers*. Los dientes de las uniones en las maderas argentinas son de 11 mm mientras que, los *fingers*

considerados en Uruguay son de 15 mm lo cual mejora el contacto y aumenta la superficie de encolado.

Por otra parte, el módulo de elasticidad de las vigas uruguayas es un 20% menor que el de las vigas ensayadas en el trabajo de Piter (2006), lo que indica que las maderas argentinas son más rígidas que las uruguayas y por lo tanto menos deformables.

Por último, comparando los valores obtenidos para la densidad se puede ver que la MLE de *E. grandis* argentino es un 15% mayor que la uruguaya.

5.4. Propiedades características de la población

Pérez Gomar (2017) en su tesis de maestría presenta valores de MLE de *E. grandis* uruguayo que se corresponden con el estudio de una primera muestra de vigas de esta madera en Uruguay (muestra 1), donde la muestra 2 es la de este trabajo. En la Tabla 5.8 se resumen estos valores.

Tabla 5.8: Valores característicos de las muestras 1 y 2.

<i>Muestra</i>	<i>n</i>	$f_k (N/mm^2)$	$E_{0,k}(N/mm^2)$	$\rho_k(kg/m^3)$
1	41	25,27	13.760	504
2	33	27,61	14.511	458

Como resultado de un análisis conjunto de las muestras 1 y 2 se halla a continuación el valor característico de la población.

Para lo anterior se tienen en cuenta las consideraciones presentadas en la norma EN 384:2016 (Apartado 4.5.2) y los resultados de las muestras que se encuentran en la Tabla 5.8 corrigiendo dichos valores, a través del coeficiente k_s , por el número de muestras y la cantidad de probetas que fueron ensayadas.

Se presentan entonces en la Tabla 5.9 los valores característicos de la población.

Tabla 5.9: Valores característicos de la población de MLE *E.grandis* uruguayo.

$f_k (N/mm^2)$	$E_{0,k}(N/mm^2)$	$\rho_k(kg/m^3)$
22,10	14095	484

5.5. Asignación de la clase resistente

Una vez determinados los valores característicos de resistencia a flexión, módulo de elasticidad y densidad para la población, existen dos caminos a seguir para obtener el resto de los valores característicos de la MLE. Uno de ellos es la utilización de ecuaciones teóricas que relacionan los 3 valores ya utilizados con el

resto de las propiedades. El segundo camino, y el utilizado en este trabajo, es la asignación de una clase resistente mediante la Tabla 5.10 según la norma EN 14080:2013.

Cada uno de los valores expuestos en la Tabla 5.9 se corresponde con una clase resistente. El valor más restrictivo (es decir, el que correspondió a la menor clase resistente) será el elegido para clasificar a la MLE ensayada.

Tabla 5.10: Clases resistente de la MLE según EN 14080:2013.

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	Clase Resistente de la MLE						
		<i>GL 20h</i>	<i>GL 22h</i>	<i>GL 24h</i>	<i>GL 26h</i>	<i>GL 28h</i>	<i>GL 30h</i>	<i>GL 32h</i>
<i>Resistencia a flexión</i>	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
<i>Resistencia a tracción</i>	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
<i>Resistencia a compresión</i>	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
<i>Resistencia a esfuerzo cortante (cortadura y torsión)</i>	$f_{v,g,k}$	3,5						
<i>Resistencia al cortante de rodadura</i>	$f_{\gamma,g,k}$	1,2						
<i>Módulo de elasticidad</i>	$E_{0,g,mean}$	8400	10500	11500	12100	12600	13600	14200
	$E_{0,g,05}$	7000	8800	9600	10100	10500	11300	11800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
<i>Módulo de elasticidad transversal</i>	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
<i>Módulo de cortante de rodadura</i>	$G_{\gamma,g,mean}$	65						
	$G_{\gamma,g,05}$	54						
<i>Densidad</i>	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490

En la Tabla 5.11 se muestra de forma esquemática como la resistencia a flexión corresponde a una clase GL22h, mientras que el módulo de elasticidad y la densidad corresponden a una clase GL30h, la cual es ampliamente mayor que la dada por el primer parámetro. Por lo anterior, la clase resistente de la población de MLE de *Eucalyptus grandis* ensayada es GL22 y se encuentra limitada por la resistencia a flexión.

Tabla 5.11: Clases resistentes de cada valor característico poblacional.

<i>Parámetro</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Clase resistente correspondiente</i>
f_{05} (N/ mm ²)	22,10	GL22
$E_{0,m}$ (N/ mm ²)	14095	GL30
ρ_{05} (kg/ m ³)	486	GL30

Piter (2006) explica este fenómeno argumentando que, los defectos de fabricación tienen una mayor incidencia sobre la resistencia que sobre la rigidez. Lo anterior, se debe a que las imperfecciones en las uniones dentadas o en el encolado de las mismas se manifiestan cuando la pieza alcanza tensiones elevadas, pero son menos significativos en el período elástico de las mismas.

Un análisis similar al anterior se puede hacer para las muestras por separado (sin realizar penalizaciones por la población) concluyéndose que, la muestra 1 se corresponde con una clase resistente GL24h mientras que la muestra 2 se corresponde con una clase resistente GL26h, ambas muestras limitadas por la resistencia a flexión.

5.5.1. Estudio de la magnitud de las penalizaciones realizadas para la MLE estructural.

Por causa de la alta variabilidad en los resultados obtenidos en maderas, se realizan varias penalizaciones hasta llegar a los valores resistentes con los que efectivamente se realiza el cálculo de una estructura.

Se hallan a continuación las pérdidas de resistencia por causa de las penalizaciones realizadas desde el valor medio de resistencia a flexión hasta obtener los siguientes:

- i) El valor característico de la muestra
- ii) El valor característico de la población dado por la clase resistente
- iii) El valor de diseño en el cálculo de estructuras (valor característico de la resistencia a flexión sobre el correspondiente factor de seguridad para la resistencia del material, $\gamma_M = 1,3$).

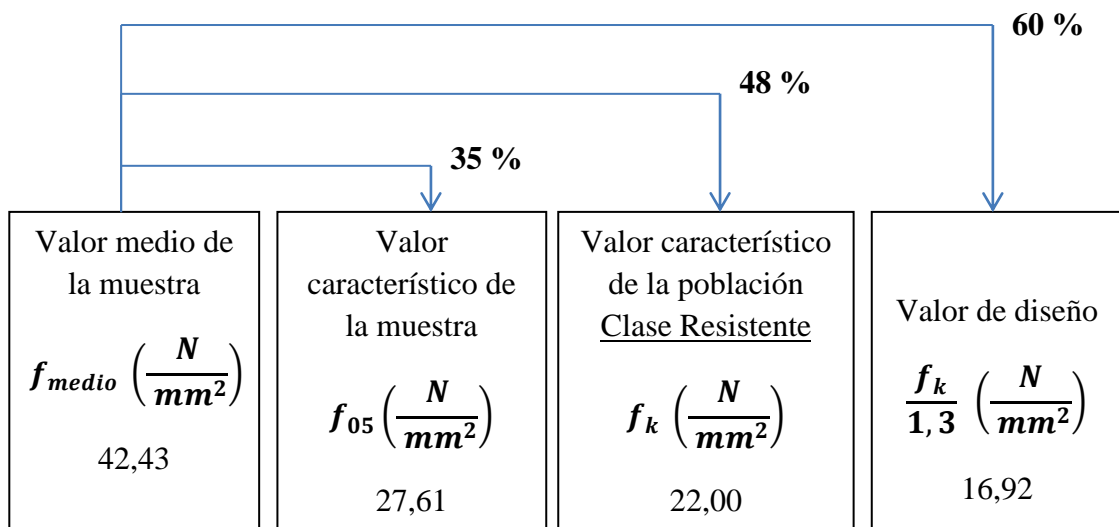


Figura 5.4: Pérdidas en la resistencia a flexión por causa de la serie de penalizaciones que se realizan para el cálculo con MLE.

Las mencionadas pérdidas se encuentran resumidas en el esquema de la Figura 5.4. Se observa que la pérdida porcentual de resistencia desde el valor medio de la muestra ensayada hasta el valor que efectivamente se utiliza para el cálculo de la estructura es de un 60%.

Con el fin de poder mostrar las pérdidas en los otros dos parámetros resistentes se presenta la Tabla 5.12.

Tabla 5.12: Pérdidas en los parámetros resistentes por causa de la serie de penalizaciones que se realizan para el cálculo con MLE.

	Valor medio de la muestra (Tabla 5.1)	Valor característico de la muestra		Valor característico de la población (por asignación de Clase Resistente)		Valor de diseño	
		Magnitud	Pérdida porcentual (%)	Magnitud	Pérdida porcentual (%)	Magnitud	Pérdida porcentual (%)
Resistencia a flexión (N/mm^2)	42,43	27,61	35	22,00	48	16,92	60
Módulo de elasticidad (kN/mm^2)	14,51	14,51	0	10,50	28	8,08	44
Densidad (kg/m^3)	505,75	458,46	9	410,00	19	315,38	38

Con base en los valores presentados en las Tabla 5.12 se observa que la mayor pérdida se da en la resistencia a flexión (con un 60%), seguida del módulo de elasticidad (con un 44%) y posteriormente de la densidad (con 38%).

Si se consideran las clases resistentes de las muestras por separado se tiene que, para llegar a la clase resistente de la población, la pérdida para la primera es de un 8,3% mientras que, para la muestra 2 es del 15,4% (Tabla 5.13).

Tabla 5.13: Pérdidas porcentuales por asignación de una clase resistente a la población.

<i>Muestra</i>	<i>Clase resistente de la muestra</i>	<i>Clase resistente de la población</i>	<i>Pérdida porcentual de resistencia (%)</i>
1	GL24h (Por la resistencia a flexión)	GL22h	8,3
2	GL26h (Por la resistencia a flexión)		15,4

5.5.2. Maderas de MLE en el mundo

A modo de tener una referencia se compara la clase resistente obtenida con maderas de Spruce (*Picea abis*) por ser muy utilizada, *Castanea Sativa* (Castaño común) por ser otra frondosa y *E. grandis* argentino por tratarse de la misma especie de madera utilizada en este trabajo (Tabla 5.14).

Tabla 5.14: Clases resistentes de las vigas de MLE comercializadas a nivel mundial en relación a la uruguayaya.

<i>GL 20h</i>	<i>GL 22h</i>	<i>GL 24h</i>	<i>GL 28h</i>
<i>E. grandis</i> argentino (a partir de clasif. visual Clase 2) *2	<i>E. grandis</i> uruguayo	<i>Picea Abis</i> (Europa) *1	<i>Picea Abis</i> (Europa) *1
		<i>E. grandis</i> argentino (a partir de clasif. visual Clase 1) *2	Castaño (España) *3

(Fuente de los valores presentados: *1-www.binderholz.com, *2-Valores extrapolados IRAM 9660-1:2005, *3- <http://www.sierolam.com/>)

Dado que se observó un fallo por adhesivo, el proceso de fabricación es mejorable y eso podría influir de forma positiva en la clase resistente final. Para lograr lo anterior, se reafirma la importancia de perfeccionar el proceso de fabricación de manera tal de lograr industrializarlo con base en las especificaciones técnicas exigidas por norma.

Capítulo 6:

Conclusiones de la Investigación

A continuación se detallan las conclusiones de este trabajo, relacionadas con los objetivos específicos planteados.

Se hallaron los valores medios de los parámetros resistentes para la muestra de 33 vigas ensayadas. Comparando los mismos con los resultados obtenidos para madera aserrada de *E. grandis* se concluye que la resistencia a flexión obtenida es menor que la hallada para la madera aserrada de la misma especie. Por otra parte, en lo que respecta al módulo de elasticidad y la densidad se observa un leve aumento en las vigas de MLE, lo que las haría menos deformables y más pesadas.

De la totalidad de las piezas ensayadas el 39% rompieron por causa de problemas con el adhesivo en las uniones (*fingers* o láminas) con una resistencia a flexión media de $f_{media} = 45,18 \text{ N/mm}^2$ mientras que el 61% restante rompieron por la madera con una resistencia a flexión media de $f_{media} = 40,64 \text{ N/mm}^2$.

Lo esperado es que la rotura siempre se dé por la madera. Una interpretación a la causa de la gran cantidad de fallas por adhesivo, es que el proceso de fabricación no sea el adecuado. Por lo tanto, es de vital importancia perfeccionar el mismo de manera tal de lograr industrializarlo con base en las especificaciones técnicas exigidas por norma.

En cuanto a la determinación de las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, y resistencia a flexión) y la densidad de la madera de la madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis*, se obtuvieron los siguientes valores característicos:

- i. Resistencia a flexión: $f_k = 27,61 \text{ N/mm}^2$
- ii. Módulo de elasticidad: $E_{0,k} = 14.511 \text{ N/mm}^2$
- iii. Densidad: $\rho_k = 458 \text{ kg/m}^3$

Los resultados anteriores no difieren en gran medida a los de Argentina y Brasil comparando con los estudios de Piter (2006) y dos Anjos & Alves (2006) respectivamente.

Por otra parte, utilizando los valores de una primera muestra de vigas de MLE de *E.grandis* estudiada en Uruguay, se obtuvieron para la población formada por ambas muestras, los siguientes valores característicos.

- i. Resistencia a flexión: $f_k = 22,10 \text{ N/mm}^2$

- ii. Módulo de elasticidad: $E_{0,k} = 14.095 \text{ N/mm}^2$
- iii. Densidad: $\rho_k = 484 \text{ kg/m}^3$

La clase resistente de la población de MLE de *Eucalyptus grandis* ensayada es GL22 y se encuentra limitada por la resistencia a flexión.

Se calculó la magnitud de las penalizaciones realizadas desde el valor medio de la muestra ensayada hasta llegar a los valores resistentes con los que efectivamente se realiza el cálculo de una estructura. La mayor pérdida se dió en la resistencia a flexión (con un 60%), seguida del módulo de elasticidad (con un 44%) y posteriormente de la densidad (con 38%).

Como posibles trabajos a futuro se plantea estudiar en mayor profundidad el adhesivo PUR y su aplicación a frondosas. Además sería útil estudiar los cambios en los valores característicos de las vigas de MLE de *E. grandis* luego de realizadas posibles mejoras en el proceso de fabricación.

Capítulo 7:

Estudio de un puente a realizar con MLE de *E. grandis*

7.1. Memoria de cálculo

7.1.1. Introducción

Los datos del PIB agropecuario muestran que dicho sector ha crecido de forma extraordinaria en estos últimos años, especialmente de la mano de la agricultura, que le dio un impulso muy importante a la economía del país en su conjunto. Un elemento elocuente de este crecimiento son las exportaciones de granos, en particular la soja, que vivió un desarrollo excepcional durante la última década (MGAP & OPYPA, 2015).

El aumento en la producción de granos sumado al incremento en la extracción forestal derivan en un déficit de infraestructura vial ligada al sector agrícola y forestal en Uruguay donde son habituales las soluciones temporales construidas con madera y normalmente ejecutadas sin ningún tipo de comprobación estructural ni de previsión de su vida útil (Baño et al., 2017).

La mencionada infraestructura vial debería contemplar los requisitos para el paso de los vehículos y la maquinaria involucrada que transportan los productos (ya sea madera o granos), dentro y fuera de los predios agroforestales.

Por lo anterior el objetivo de este estudio es proponer una solución para salvar accidentes geográficos (ya sean arroyos, canales, etcétera), para el paso de vehículos de hasta 36 t, realizado con MLE desarrollada en Uruguay a partir de madera de *Eucalyptus grandis*.

Para ello, se presenta en este capítulo el diseño de la estructura de un puente de 15 metros de luz, el mismo estará enmarcado en las bases de cálculo brindadas por el Eurocódigo 5 y será desarrollado a modo de ante-proyecto, con memoria descriptiva y cálculo estructural.

7.1.2. Generalidades

La presente memoria describe el diseño y cálculo estructural de un puente de madera de 15 metros de largo por 5 de ancho. El mismo está formado por una senda vehicular central de 3 metros de ancho y una senda peatonal de 1 metro de ancho a cada lado.

El puente se compone de doce vigas longitudinales agrupadas de a tres, cuya longitud es la misma que la luz del puente. Sobre estas vigas longitudinales descansan viguetas transversales que ocupan todo el ancho del puente. Sobre la estructura de madera hay una carpeta asfáltica de 5cm por la cual transitan los vehículos y peatones (Figura 7.1).

Como se mencionó en el Capítulo 3, en el cálculo de estructuras de madera no solo es importante conocer la clase resistente del material que se utilizará sino también la clase de servicio y la clase de uso a la que la estructura estará sometida.

Se prevé que el puente estará expuesto a una clase de servicio Clase 2. A pesar de lo anterior, para estar del lado de la seguridad, y para prever posible acumulación de agua debido a la probable falta de mantenimiento, el diseño del presente puente se realizó de manera tal que la clase de servicio de todos los elementos que lo componen sea Clase 3 (asumiendo condiciones climáticas que conduzcan a contenidos de humedad superiores al de la clase de servicio 2).

La madera se protegerá recubriéndola superficialmente con una carpeta asfáltica, además, mediante el diseño se buscará evitar la acumulación de agua en la estructura (a través de voladizos en la viguetas transversales).

Con la protección anterior se evita que la madera esté en contacto directo y permanente con agua de forma tal que la clase de uso del puente sea Clase 2.

Los cálculos estructurales se basan en la norma europea Eurocódigo 5: en su parte 1 “Proyecto de estructuras de madera, Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación” (UNE-EN 1995-1-1:2006/A2:2015) y en la Parte 2: “Puentes” (UNE-EN 1995-2 2011).

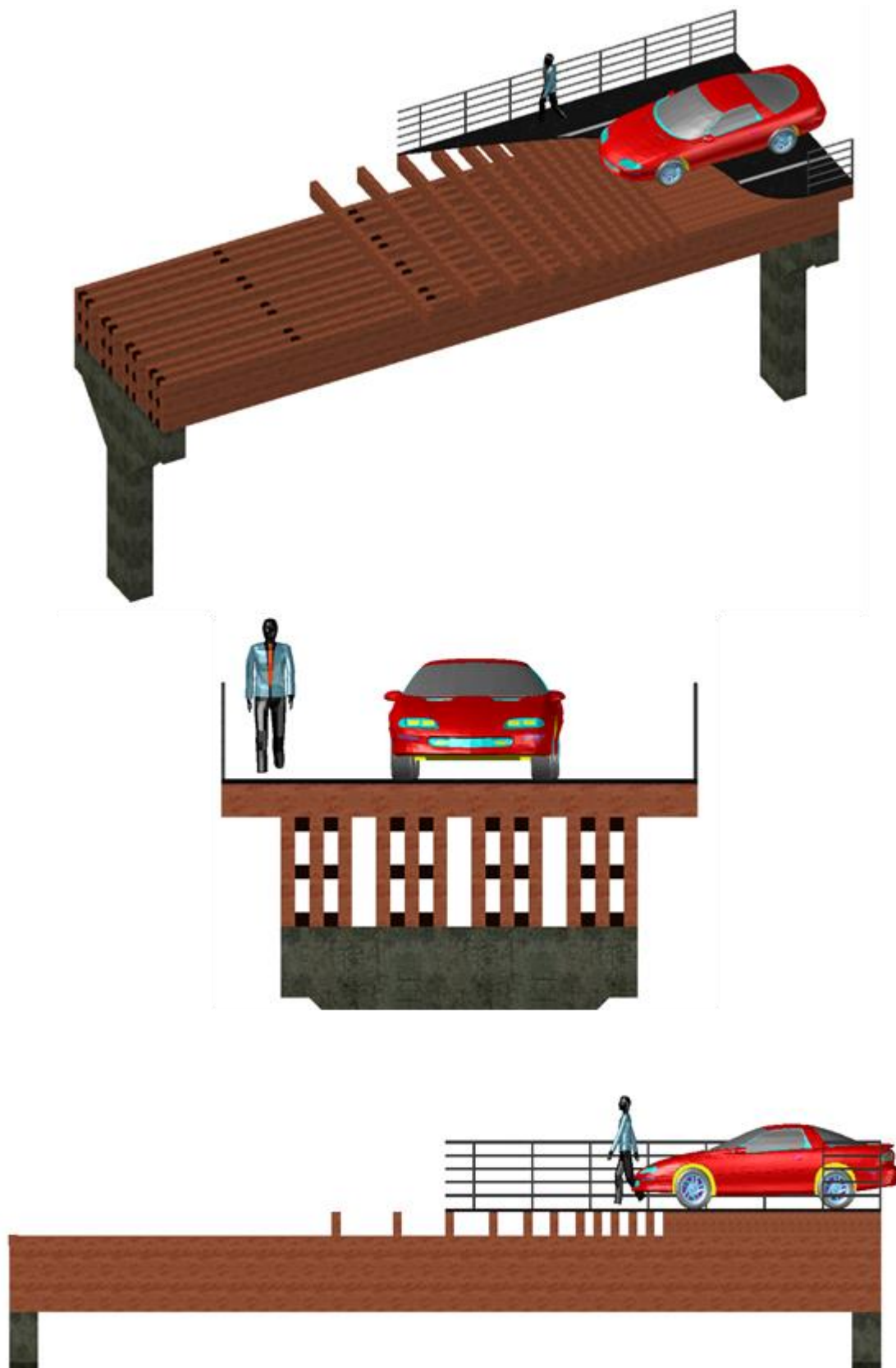


Figura 7.1: Prototipo del puente a diseñar. Vista en 3D, frontal y lateral.

Materiales utilizados para la fabricación

Madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* de clase resistente GL 24h (UNE-EN 14080 2013), con las propiedades mecánicas que se muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Propiedades de la MLE utilizada en el cálculo del puente.

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
Resistencia a flexión	$f_{m,y,k}$	24 N/mm ²
Resistencia a compresión paralela a las fibras	$f_{c,0,k}$	24 N/mm ²
Resistencia a compresión perpendicular a las fibras	$f_{c,90,k}$	2,5 N/mm ²
Módulo de elasticidad	E_m	9.600 N/mm ²
Densidad	$\rho_{g,k}$	4,3 kN/m ³

Asfalto, cuya densidad se encuentra en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Propiedades del asfalto utilizado en el cálculo del puente.

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
Densidad	ρ_{asf}	18 kN/m ³

Pre-dimensionado

Se tienen en cuenta las siguientes consideraciones geométricas para la elección de las secciones de vigas longitudinales y viguetas transversales.

- i. Se considera un ancho de viga y viguetas de 15cm ya que este valor es el que se consigue usualmente en el mercado.
- ii. Para la altura de las vigas y viguetas la limitación que se tiene es el alto de las prensas en las que se fabricaron.

Con base en lo anterior se utilizarán para el diseño:

- i. Vigas longitudinales de sección transversal $B \times H = 150 \text{ mm} \times 950 \text{ mm}$, agrupadas de a tres y con una separación entre ellas de 150 mm.
Para el cálculo estructural se simplificará la sección de la viga triple a una sección rectangular de $450 \text{ mm} \times 950 \text{ mm}$.
- ii. Vigas transversales de $b \times h = 150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$

7.1.3. Cargas

Se presentan a continuación las cargas consideradas en el cálculo.

Cargas permanentes

Los pesos propios de los elementos que componen la estructura son:

$$PP_{Viguetas} = \rho_{g,k} \cdot b \cdot h = 4,3kN/m^3 \cdot 0,15m \cdot 0,25m = 0,161 kN/m$$

$$PP_{Vigas} = \rho_{g,k} \cdot B \cdot H = 4,3kN/m^3 \cdot 0,15m \cdot 0,95m = 0,613 kN/m$$

$$PP_{Asfalto} = \rho \cdot b \cdot h = 18kN/m^3 \cdot 0,15m \cdot 0,05m = 0,135 kN/m$$

$$CP_{viguetas} = PP_{Asfalto} + PP_{Viguetas} = 0,135 kN/m + 0,161kN/m = 0,296 kN/m$$

$$CP_{vigas} = PP_{Asfalto} + PP_{Viguetas} + PP_{Vigas} = 0,135 kN/m + 0,161kN/m + 0,613 kN/m = 0,909 kN/m$$

Donde,

PP es el peso propio del elemento por unidad de longitud (kN/m)

$\rho_{g,k}$ es la densidad característica del elemento (kN/m^3)

b, B son los anchos de las viguetas y vigas respectivamente (m)

h, H son los cantos de las viguetas y vigas respectivamente (m)

CP es la carga permanente (kN/m)

Sobrecargas de uso

En base a las recomendaciones del Pliego General de Condiciones para la Realización de Proyectos de Puentes del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (Decreto N°9/990, 1990) se utilizan las que se detallan a continuación;

Sobrecarga de uso correspondiente a sobrecargas los peatones

Para las sendas peatonales se considera una carga uniformemente distribuida de $U1 = 3,0 kN/m^2$.

Sobrecarga de uso correspondiente a los autos

Para el carril central se considera una sobrecarga de uso uniformemente distribuida correspondiente a los autos igual a $U2 = 5,0 kN/m^2$.

Sobrecarga de uso correspondiente a un camión

Para modelar a un camión circulando, se considera un vehículo de las dimensiones de la Figura 7.2.

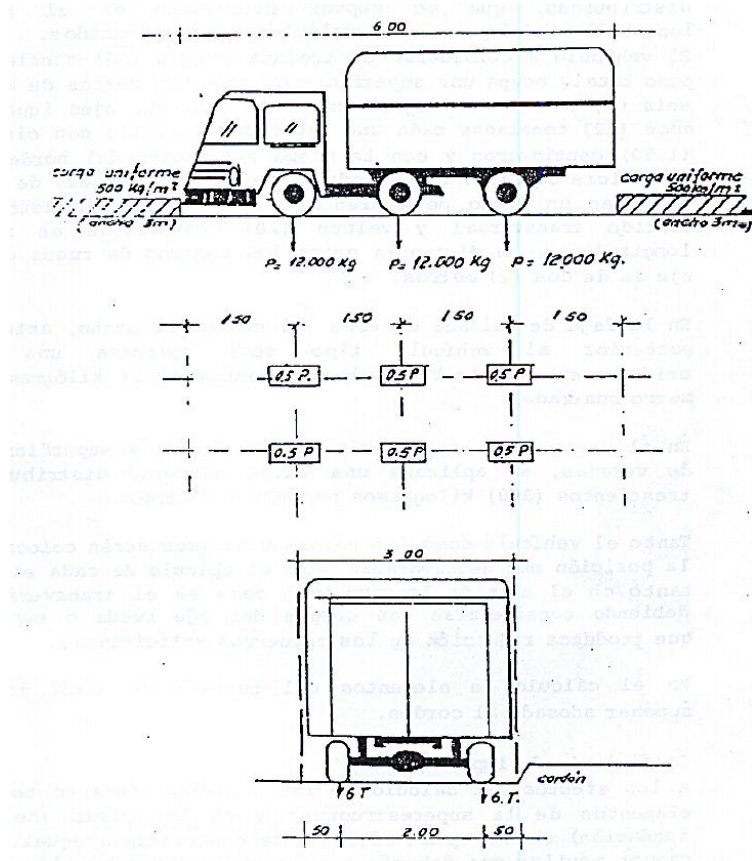


Figura 7.2: Dimensiones y descargas de un camión para el proyecto de puentes (MTOP, 1990).

Se clara que se decidió utilizar esta normativa si bien no es la vigente actualmente, (existen recomendaciones complementarias del MTOP del año 2003 que definen un camión de 45 toneladas).

Cada rueda descarga $P_{puntual} = 60 \text{ kN}$ sobre una superficie de $0,4 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$.

Para las viguetas lo anterior equivale a una carga de superficie $P_{superficie} = 0,75 \text{ kN/m}^2$ o a una carga lineal distribuida $P_{lineal} = 0,1125 \text{ kN/m}$.

7.1.4. Estados de carga

Se considerarán distintos estados de carga para:

- i. Verificación de viguetas
- ii. Verificación de vigas.

En la Tabla 7.3 se muestran las distintas combinaciones de carga con los factores de seguridad correspondientes.

Para el caso de las vigas la diferencia entre el caso 2 y 3 es la ubicación de la carga P, en el caso 2 la carga está exactamente en el punto medio del puente mientras que en el caso 3 se encuentra sobre uno de los apoyos.

Tabla 7.3: Coeficientes de seguridad de las cargas, combinaciones de cargas.

<i>Combinación de cargas</i>	<i>CP</i>	<i>U1</i>	<i>U2</i>	<i>P</i>
1 (CP)	1,35			
2 (CP+U1+U2+Pmedio)	1,35	1,5	1,5	1,5
3 (CP+U1+U2+Ppunta)	1,35	1,5	1,5	1,5

7.1.5. Modelos computacionales

Se utilizó un modelo computacional simplificado en el software SAP2000 para obtener valores aproximados de las tensiones y el comportamiento de la estructura.

Para esto se realizó un modelo tridimensional del puente, que consiste en doce elementos de tipo *frame* que modelan a las vigas longitudinales sobre los que apoyan ochenta y ocho *frames* que modelan a las viguetas. Es sobre estos últimos que se aplican todas las cargas correspondientes a peatones y vehículos.

En la Figura 7.3 se puede ver a modo de ejemplo el cortante resultante al considerar un camión en un extremo del puente y autos en todo el resto del mismo.

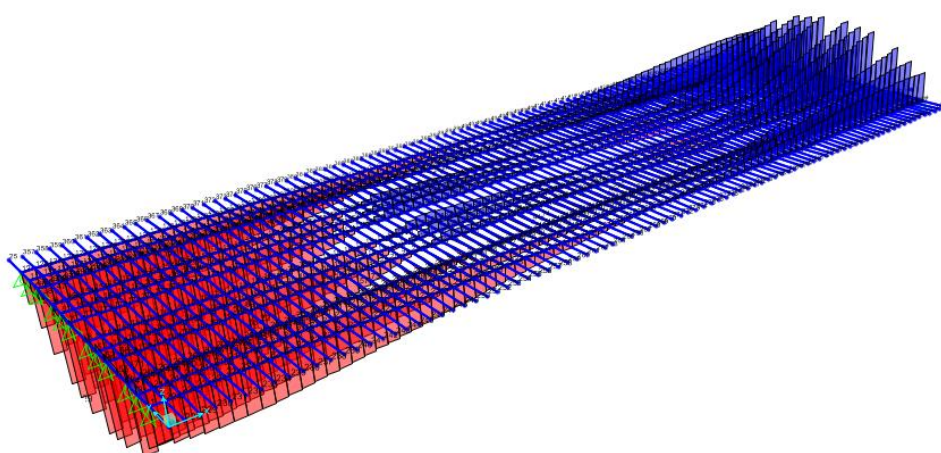


Figura 7.3: Diagrama de cortante en el modelo de SAP2000 para la combinación de carga 3 (Tabla 7.1).

7.1.6. Estados límite últimos

Una vez definidos todos los estados de carga a utilizar, se procede a realizar las verificaciones de las vigas y viguetas de MLE que conformarán la estructura.

Viguetas

El esquema básico de cálculo para las viguetas consiste en una viga continua apoyada sobre las doce vigas principales. Se tomó para las verificaciones la vigueta más solicitada.

Flexión simple

Para verificar las viguetas a flexión es necesario obtener del modelo de cálculo el momento flector según "x", de acuerdo a Figura 7.4, para determinar si la tensión a la que estarán sometidas las vigas es menor que la resistencia de las mismas.

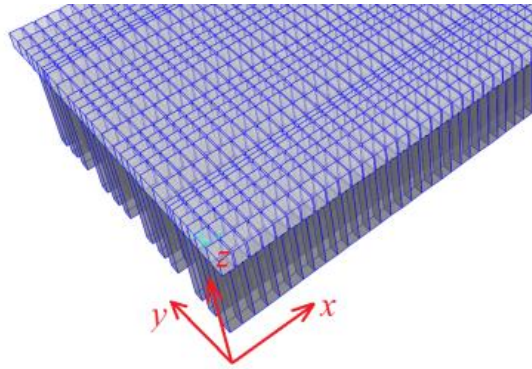


Figura 7.4: Ejes cartesianos del modelo realizado para la estructura.

La verificación estipulada por la norma es la siguiente,

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

Los factores de mayoración de cargas y minoración de resistencias se incluyen en las expresiones de $\sigma_{m,y,d}$ y $f_{m,y,d}$.

Donde las solicitaciones están dadas por,

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{max} \cdot \frac{h}{2}}{I_y} = \frac{M_{max} \cdot 125mm}{1,95 \cdot 10^8 mm^4} = M_{max} \cdot 6,4 \cdot 10^{-7} (mm^{-3})$$

Mientras que la resistencia se obtiene planteando,

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod} \cdot k_h}{\gamma} = \frac{24 N/mm^2 \cdot k_{mod} \cdot 1,095}{1,3} = 20,150 \cdot k_{mod} N/mm^2$$

Donde,

k_{mod} , es un coeficiente que disminuye la resistencia de la madera en función de la clase de servicio y la duración de la carga de menor permanencia de cada combinación. Los k_{mod} considerados se encuentran en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4: Coeficiente reductor de la resistencia (k_{mod}).

Combinación de cargas	Duración carga	k_{mod}
1 (CP)	Permanente	0,6
2 (CP+U1+U2+Pmedio)	Corta	0,9
3 (CP+U1+U2+Ppunta)	Corta	0,9

k_h , es un factor que modifica la resistencia a flexión en función del canto de la pieza. Su expresión está dada por,

$$k_h = \min \left\{ \frac{600^{0,1}}{h}, 1,1 \right\}$$

γ , es el coeficiente de seguridad de la madera. Si bien para la madera laminada encolada la norma europea utilizada recomienda un valor de γ igual a 1,25 (menos restrictivo que el coeficiente para madera maciza) por motivos de seguridad y por causa del escaso control en el proceso de producción de la MLE en Uruguay en este cálculo se considerará $\gamma = 1,3$ (como si se tratase de madera maciza).

Finalmente,

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{M_{max} \cdot 6,4 \cdot 10^{-7} mm^{-3}}{20,150 \cdot k_{mod} N/mm^2} = \frac{M_{max} \cdot 3,176 \cdot 10^{-8} (N/mm)}{k_{mod}}$$

Se considerará un “Factor de Seguridad” (F.S.) que corresponde a que tan por encima se encuentra la resistencia minorada sobre el esfuerzo mayorado que solicita la pieza. El valor se puede obtener como sigue:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{1}{F.S.} \leq 1$$

En la Tabla 7.5 se muestran los valores de resistencia a flexión, momento máximo considerado y el factor de seguridad explicado en el párrafo anterior, obtenidos para cada uno de los distintos estados de carga estudiados.

Tabla 7.5: Viguetas. Verificaciones a flexión simple para los distintos estados de carga.

Estados		1	2	3
Momento flector máximo (Nmm)	M_{max}	0,2	4,70	4,01
Tensión calculo (N/mm ²)	$\sigma_{m,y,d}$	0,13	3,00	2,57
Resistencia calculo (N/mm ²)	$f_{m,y,d}$	12,09	18,14	18,14
Factor de Seguridad	F.S.	94,46	6,03	7,07

Cortante

Para verificar las viguetas a cortante es necesario obtener del modelo de cálculo el valor de cortante máximo. La verificación a realizar es la siguiente:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \Rightarrow \frac{f_{v,d}}{\tau_d} = F.S.$$

Donde el esfuerzo cortante que solicita la pieza es,

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V_{max}}{b \cdot h \cdot k_{fend}} = \frac{1,5 \cdot V_{max}}{150mm \cdot 250mm \cdot 0,67} = V_{max} \cdot 5,97 \cdot 10^{-5} (mm^{-2})$$

Siendo k_{fend} , el factor que considera las fendas de la madera, aumentando así el esfuerzo al que realmente se someterán las piezas.

La resistencia está dada por,

$$f_{v,d} = \frac{f_{c,90,k}}{\gamma} = \frac{2,5 N/mm^2}{1,3} = 1,923 N/mm^2$$

De sustituir las expresiones anteriores resulta,

$$\frac{f_{v,d}}{\tau_d} = \frac{1,923 N/mm^2}{V_{max} \cdot 0,0597 (mm^{-2})} = \frac{32,21 kN}{V_{max}} = F.S.$$

En la Tabla 7.6 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los distintos estados de carga. Como se podrá ver al comparar con los demás resultados, esta verificación es la que dimensiona las viguetas.

Tabla 7.6: Viguetas. Verificaciones a cortante para los distintos estados de carga.

Estados		1	2	3
Esfuerzo cortante (N)	V_{max}	340	32.080	32.050
Tensión calculo (N/mm ²)	τ_d	0,02	1,92	1,91
Resistencia calculo (N/mm ²)	$f_{v,d}$	1,92	1,92	1,92
Factor de Seguridad	F.S.	94,74	1,01	1,01

Vuelco lateral

Para verificar las viguetas frente al vuelco lateral es necesario distinguir dos situaciones, una de ellas es el vuelco local del voladizo y la otra, el vuelco de los tramos interiores de las viguetas.

Por norma se tiene,

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,y,d} \Rightarrow \frac{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}}{\sigma_{m,y,d}} = F.S.$$

Donde k_{crit} se obtiene a través de la siguiente expresión,

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \rightarrow \text{para } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \rightarrow \text{para } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \rightarrow \text{para } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

El valor $\lambda_{rel,m}$ se halla de la siguiente manera,

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,y,d}}{\sigma_{m,crit}}}$$

$\sigma_{m,crit}$ es,

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_z \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor}}}{l_{ef} \cdot W_y}$$

Sustituyendo,

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \cdot \sqrt{\frac{9.400N}{mm^2} \cdot 7,0 \cdot 10^8 mm^4 \cdot \frac{720N}{mm^2} \cdot 8,2 \cdot 10^8 mm^4}}{l_{ef} \cdot 1,6 \cdot 10^3 mm^4} = \frac{1,255 \cdot 10^6 N/mm^2}{l_{ef}}$$

Finalmente se obtiene,

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,y,d}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{20,150 \cdot k_{mod} N/mm^2}{\frac{1,255 \cdot 10^6 N/mm^2}{l_{ef}}}} = 0,004 \cdot \sqrt{k_{mod} \cdot l_{ef}}$$

l_{ef} es el largo efectivo y se obtiene de la norma a partir del tipo de viga y tipo de carga. Para los casos estudiados, valdrá 0,8 o 1,0 dependiendo si se trata del voladizo o de los tramos interiores respectivamente.

Por otra parte, dado que en todos los casos $\lambda_{rel,m}$ es menor que 0,75 se considera un k_{crit} igual a 1. Una vez determinados todos estos valores se obtienen los resultados de la Tabla 7.7.

Tabla 7.7: Viguetas. Verificaciones al vuelco lateral para los distintos estados de carga.

<i>Estados</i>		1	2	3
<i>Momento máximo voladizo (Nmm)</i>	M_{max}	0,10	0,69	0,21
<i>Momento máximo simpl. ap (Nmm)</i>	M_{max}	0,27	4,70	4,01
<i>Tensión calculo voladizo (N/mm²)</i>	$\sigma_{m,y,d}$	0,06	0,44	0,13
<i>Tensión calculo simpl. ap. (N/mm²)</i>	$\sigma_{m,y,d}$	0,17	3,01	2,57
<i>Resistencia calculo voladizo (N/mm²)</i>	$k_{crit} \cdot f_{m,y,d}$	12,09	18,14	18,14
<i>Resistencia calculo simpl. ap. (N/mm²)</i>	$k_{crit} \cdot f_{m,y,d}$	12,09	18,14	18,14
<i>Factor de Seguridad voladizo</i>	F.S.	188,91	41,07	134,94
<i>Factor de Seguridad tramos interiores</i>	F.S.	69,97	6,03	7,07

Pandeo

Si bien las viguetas no están puramente comprimidas, al estar flexionadas, la parte que presenta esfuerzos normales de compresión podría llegar a pandear en el caso de que las tensiones superen a las tensiones críticas de pandeo.

Si se verifica el pandeo según la dirección "x" y la dirección "z" (Figura 7.4) se tiene:

Para la dirección "z"

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

Para la dirección "x"

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

Donde,

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = 1,008$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 1,004$$

Con,

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,521$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,534$$

El valor de β_c se obtiene de la norma y a partir del tipo de madera, para este caso vale 0,1.

Además,

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 0,223$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 0,267$$

En la Tabla 7.8 se muestran los valores de la fuerza de compresión para los distintos estados de carga, la misma se calcula como se muestra,

$$C = \sigma_{max} \cdot b \cdot \frac{h}{2} = \sigma_{max} \cdot 150mm \cdot \frac{250mm}{2} = \sigma_{max} \cdot 18.750mm^2$$

Tabla 7.8: Viguetas. Fuerza de compresión para la verificación del pandeo para cada uno de los estados de carga.

Estados		1	2	3
Momento flector máximo (Nmm)	M_{max}	0,20	4,70	4,01
Tensión Máxima (N/mm²)	σ_{max}	0,13	3,01	2,57
Compresión (N)	C	1.200	28.200	24.060

Según la dirección "z" se obtienen los valores de la Tabla 7.9. Cabe destacar que los siguientes cálculos son sobre la sección comprimida de la viga.

Tabla 7.9: Viguetas. Verificaciones al pandeo según "z" para los distintos estados de carga.

Estados		1	2	3
Mflec,y sección análoga (Nmm)		0,03	0,59	0,50
Tensión de compresión (N/mm²)	$\sigma_{c,0,d}$	0,06	1,50	1,28
Tensión de flexión (N/mm²)	$\sigma_{m,y,d}$	0,06	1,50	1,28
$\sigma_{c,0,d} / \sigma_{m,y,d}$		0,01	0,09	0,08
$\sigma_{c,0,d} / k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}$		0,01	0,09	0,08
Verificación tensiones < 1		0,01	0,18	0,15
Factor de Seguridad	F.S.	86,89	5,55	6,50

Realizando los mismos cálculos pero para la sección según la dirección "x", donde la carga está centrada, se obtienen los valores de la Tabla 7.10.

Tabla 7.10: Viguetas. Verificaciones al pandeo según "x" para los distintos estados de carga.

<i>Estados</i>		1	2	3
<i>Tensión de compresión (N/mm²)</i>	$\sigma_{c,0,d}$	0,06	1,50	1,28
<i>Resistencia de cálculo compresión (N/mm²)</i>	$k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}$	11,12	16,67	16,67
<i>Factor de Seguridad</i>	F.S.	173,69	11,09	13,99

Si se comparan los valores expuestos en la Tabla 7.9 y la Tabla 7.10 se puede observar que el menor factor de seguridad se obtiene según la dirección "z", por lo que en caso de existir el fenómeno de pandeo sería según la misma. A pesar de lo anterior, la parte tensionada de las secciones sirve como arriostre frente a este fenómeno, por lo que en caso necesario, se podrían introducir ciertas hipótesis y consideraciones en los cálculos para que los mismos no sean tan restrictivos.

Aplastamiento en los apoyos

La siguiente verificación para hacer a las viguetas es el aplastamiento en los apoyos, es decir, la compresión perpendicular a las fibras en la zona donde descansan sobre las vigas principales del puente.

La norma indica lo siguiente,

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \leq 1 = F.S.$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{R_{max}}{b \cdot B} = \frac{R_{max}}{150mm \cdot 150mm} = 4,44 \cdot 10^{-5} \cdot R_{max} \cdot mm^{-2}$$

$k_{c,90}$ es un factor que tiene en cuenta la posibilidad de fendado y el grado de deformación por compresión.

Realizando los cálculos para los apoyos laterales y para los apoyos interiores se obtiene lo siguiente:

Para los apoyos laterales,

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{b}{250}\right) \cdot \left(1 + \frac{h}{6 \cdot b}\right) = 2,274$$

Para los apoyos interiores,

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{b}{250}\right) \cdot \left(\frac{l_{ef}}{l}\right)^{0,5} = 2,586$$

Donde $l_{ef} = b + \frac{2 \cdot h}{3}$.

Una vez obtenidos ambos valores de $k_{c,90}$ se realizaron los cálculos presentados cuyos resultados figuran en la Tabla 7.11 y la Tabla 7.12 dependiendo si se trata de los apoyos interiores o los laterales.

Tabla 7.11: Viguetas. Resultados del estudio de aplastamiento en los apoyos para apoyos interiores.

<i>Estados</i>		1	4	5
<i>Reacción en el apoyo (N)</i>		330	5.643	5.658
<i>Tensión compresión perp. (N/mm²)</i>	$\sigma_{c,90,d}$	0,01	2,51	2,51
<i>Resistencia de compresión perp. (N/mm²)</i>	$k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$	3,94	3,94	3,94
<i>Factor de Seguridad</i>	F.S.	295,24	1,57	1,57

Tabla 7.12: Viguetas. Resultados del estudio de aplastamiento en los apoyos para apoyos laterales.

<i>Estados</i>		1	4	5
<i>Reacción en el apoyo (N)</i>	R_{max}	420	2.320	2.000
<i>Tensión compresión perp. (N/mm²)</i>	$\sigma_{c,90,d}$	0,02	0,10	0,89
<i>Resistencia de compresión perp. (N/mm²)</i>	$k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$	4,48	4,48	4,48
<i>Factor de Seguridad</i>	F.S.	239,80	43,41	50,36

En la Tabla 7.11 y Tabla 7.12 se observa que el aplastamiento de las fibras se verifica, aunque en los apoyos interiores no hay mucho margen para aumentar la carga o disminuir la sección si así se deseara.

Finalizan aquí las comprobaciones realizadas para el ELU en viguetas. Se concluye de esta manera que la sección de $b \times h = 150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ considerada verifica los distintos fenómenos estudiados en los diferentes estados de carga propuestos siendo apta para la estructura.

Se destaca que la sollicitación que dimensiona las viguetas es el cortante cuando el puente está cargado totalmente con peatones, autos y camión. La resistencia obtenida con las secciones consideradas es apenas un 1% mayor que la mínima requerida por norma.

Vigas

Para el cálculo de las doce vigas principales se utilizara el modelo computacional antes mencionado, el mismo consta de doce vigas apoyadas en sus extremos y sobre ellas las viguetas que forman el tablero.

Las verificaciones son análogas que para el caso de las viguetas.

Flexión simple

Nuevamente se debe verificar,

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

Donde,

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{max} \cdot \frac{h}{2}}{I_y} = \frac{M_{max} \cdot 475mm}{1,9 \cdot 10^9 mm^4} = M_{max} \cdot 2,5 \cdot 10^{-7} (mm^{-3})$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod} \cdot k_h}{\gamma} = \frac{24 N/mm^2 \cdot k_{mod} \cdot 0,937}{1,3} = 17,632 \cdot k_{mod} N/mm^2$$

Sustituyendo,

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{M_{max} \cdot 2,5 \cdot 10^{-8} mm^{-3}}{17,632 \cdot k_{mod} N/mm^2} = \frac{M_{max} \cdot 1,42 \cdot 10^{-9} N/mm)}{k_{mod}} = \frac{1}{F.S.} \leq 1$$

En la Tabla 7.13 se resumen los valores obtenidos para cada uno de los estados utilizados.

Tabla 7.13: Vigas. Verificaciones a flexión simple para los distintos estados de carga.

Estados		1	2	3
Momento flector máximo (Nmm)	M_{max}	31,26	335,24	199,35
Tensión calculo (N/mm²)	$\sigma_{m,y,d}$	1,39	14,86	8,84
Resistencia calculo (N/mm²)	$f_{m,y,d}$	10,60	15,87	15,87
Factor de Seguridad	F.S.	7,64	1,07	1,80

Cortante

Al igual que en el caso de las viguetas es necesario obtener el valor del cortante máximo y realizar los siguientes cálculos,

$$\tau_d \leq f_{v,d} \Rightarrow \frac{f_{v,d}}{\tau_d} = F.S.$$

Donde,

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V_{max}}{b \cdot h/2 \cdot k_{sys}} = \frac{1,5 \cdot V_{max}}{150mm \cdot 475mm \cdot 0,67} = V_{max} \cdot 3,142 \cdot 10^{-5} (mm^{-2})$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{c,90,k}}{\gamma} = \frac{2,5N/mm^2}{1,3} = 1,923N/mm^2$$

Sustituyendo,

$$\frac{f_{v,d}}{\tau_d} = \frac{1,923N/mm^2}{V_{max} \cdot 3,142 \cdot 10^{-5} (mm^{-2})} = \frac{6,121 \cdot 10^4 N}{V_{max}} = F.S.$$

En la Tabla 7.14 aparecen los valores obtenidos para cada uno de los estados de carga, se recuerda que en el estado 3 se ubica al camión sobre uno de los apoyos, razón por la cual el cortante es notoriamente mayor al de los demás casos.

Tabla 7.14: Vigas. Verificaciones a cortante para los distintos estados de carga.

<i>Estados</i>		1	2	3
<i>Esfuerzo cortante (N)</i>	V_{max}	18.190	66.990	92.860
<i>Tensión calculo (N/mm²)</i>	τ_d	0,286	1,052	1,458
<i>Resistencia calculo (N/mm²)</i>	$f_{v,d}$	1,923	1,923	1,923
<i>Factor de Seguridad</i>	F.S.	6,73	1,83	1,32

Vuelco lateral

Para verificar las vigas frente al vuelco lateral basta hacer una sola verificación en todo el largo de la misma a diferencia de las viguetas que presentaban un voladizo, por lo que era necesario hacer dos verificaciones. Se deberá comprobar entonces,

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,y,d} \Rightarrow \frac{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}}{\sigma_{m,y,d}} = F.S.$$

Donde,

$$\begin{aligned}\sigma_{m,crit} &= \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_z \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor}}}{l_{ef} \cdot W_y} \\ &= \frac{\pi \cdot \sqrt{9.400 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,07 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \cdot 720 \text{ N/mm}^2 \cdot 3,1 \cdot 10^9 \text{ mm}^4}}{15,8 \cdot 3,3 \cdot 10^7 \text{ mm}^3} \\ &= 90,278 \text{ N/mm}^2 \\ \lambda_{rel,m} &= \sqrt{\frac{f_{m,y,d}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{17,632 k_{mod} \text{ N/mm}^2}{90,278 \text{ N/mm}^2}} = 0,4419 \cdot \sqrt{k_{mod}}\end{aligned}$$

Como para todos los casos $\lambda_{rel,m}$ es menor que 0,75 se considera un k_{crit} igual a 1. El valor de l_{ef} se obtiene de la norma a partir del tipo de viga y tipo de carga, para este caso valdrá 15,8m.

Una vez determinados todos estos valores se obtienen los resultados de la Tabla 7.15, allí se ve que verifica el vuelco lateral.

Tabla 7.15: Vigas. Verificaciones al vuelco lateral para los distintos estados de carga.

<i>Estados</i>		1	2	3
<i>Momento máximo (Nmm)</i>	M_{max}	31,26	335,24	199,35
<i>Tensión calculo. (N/mm²)</i>	$\sigma_{m,y,d}$	1,386	14,858	8,836
<i>Resistencia calculo (N/mm²)</i>	$k_{crit} \cdot f_{m,y,d}$	10,579	15,869	15,869
<i>Factor de Seguridad</i>	F.S.	7,64	1,07	1,80

Pandeo

Al igual que como sucede con las viguetas, la parte comprimida de las vigas flexionadas tienen la posibilidad de pandear. Por esto, se realizan las siguientes verificaciones para las direcciones "y" y "z".

Donde para la dirección "z",

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

Y para la dirección "y",

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

Además se tiene que,

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = 0,99$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 1,02$$

Y,

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,572$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,494$$

El valor de β_c se obtiene de la norma y a partir del tipo de madera, en este caso vale 0,1. Por otra parte el parámetro λ_{rel} para cada dirección se define como,

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 0,371$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 0,097$$

Lo siguiente es obtener la fuerza de compresión para cada uno de los estados de carga como se muestra en la Tabla 7.16.

$$C = \sigma_{max} \cdot b \cdot \frac{h}{2} = \sigma_{max} \cdot 150mm \cdot \frac{475mm}{2} = \sigma_{max} \cdot 35.625mm^2$$

Tabla 7.16: Vigas. Fuerza de compresión para la verificación del pandeo para cada uno de los estados de carga.

<i>Estados</i>		1	2	3
<i>Momento flector máximo (Nmm)</i>	M_{max}	31,26	335,24	199,35
<i>Tensión Máxima (N/mm²)</i>	σ_{max}	1,386	14,848	8,836
<i>Compresión (N)</i>	C	49.358	529.326	314.763

En la Tabla 7.17 y Tabla 7.18 se pueden ver los valores que se obtienen para la verificación por pandeo según las direcciones consideradas. Cabe destacar que los siguientes cálculos son sobre la sección comprimida de la viga.

Tabla 7.17: Vigas. Verificaciones al pandeo según "z" para los distintos estados de carga.

<i>Estados</i>		1	2	3
<i>Mflec,y sección análoga (Nmm)</i>		3,91	41,91	24,92
<i>Tensión de compresión (N/mm²)</i>	$\sigma_{c,0,d}$	0,69	7,43	4,42
<i>Tensión de flexión (N/mm²)</i>	$\sigma_{m,y,d}$	0,69	7,43	4,42
$\sigma_{c,0,d} / \sigma_{m,y,d}$		0,06	0,45	0,27
$\sigma_{c,0,d} / k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}$		0,06	0,45	0,27
<i>Verificación tensiones < 1</i>		0,13	0,90	0,53
<i>Factor de Seguridad</i>	F.S.	7,96	1,11	1,87

Tabla 7.18: Vigas. Verificaciones al pandeo según "y" para los distintos estados de carga.

<i>Estados</i>		1	2	3
<i>Tensión de compresión (N/mm²)</i>	$\sigma_{c,0,d}$	0,69	7,43	4,42
<i>Resistencia de cálculo compresión (N/mm²)</i>	$k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}$	11,29	16,93	16,93
<i>Factor de Seguridad</i>	F.S.	16,29	2,28	3,83

Si se comparan la Tabla 7.17 y Tabla 7.18 se puede observar que el menor factor de seguridad se obtiene según la dirección vertical ("z"), por lo que en caso de existir el fenómeno de pandeo sería según esta dirección. Al igual que como se mencionó para viguetas, la parte traccionada de las secciones sirve como arriostre frente a este fenómeno por lo que en caso de no cumplir con las verificaciones se podría considerar este aporte.

Aplastamiento en los apoyos

La siguiente verificación para hacer a las vigas es el aplastamiento en los apoyos, es decir, la compresión perpendicular a las fibras en la zona donde descansan sobre los neoprenos de los cabezales del puente.

La norma indica lo siguiente,

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} = \frac{1}{F.S.} \leq 1$$

Donde,

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{R_{max}}{L \cdot B} = \frac{R_{max}}{150mm \cdot 150mm} = 4,44 \cdot 10^{-5} R_{max} mm^{-2}$$

Siendo L el largo mínimo de cada uno de los neoprenos a utilizar.

Para los apoyos de las vigas se tiene que,

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{b}{250}\right) \cdot \left(1 + \frac{h}{12 \cdot b}\right) = 2,917$$

Una vez obtenido $k_{c,90}$, se realizan los cálculos cuyos resultados figuran en la Tabla 7.19.

Tabla 7.19: Viguetas. Resultados del estudio de aplastamiento en los apoyos para apoyos.

<i>Estados</i>		1	2	3
<i>Reacción en el apoyo (N)</i>		19.83	85.63	103.91
<i>Tensión compresión perp. (N/mm²)</i>	$\sigma_{c,90,d}$	0,88	3,81	4,62
<i>Resistencia de compresión perpendicular (N/mm²)</i>	$k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$	5,05	5,05	5,05
<i>Factor de Seguridad</i>	F.S.	5,73	1,33	1,09

En la Tabla 7.19 se puede ver que se verifica el aplastamiento de las fibras. Si bien se podrían achicar un poco los neoprenos se utilizaran apoyos de sección cuadrada de 15cm de lado.

Finalizan aquí las verificaciones del ELU realizadas para vigas longitudinales, se puede ver que la flexión y el vuelco lateral son los que dimensionan las piezas obteniéndose, con las secciones de $B \times H = 150 \text{ mm} \times 950 \text{ mm}$, una resistencia 7% mayor a la requerida por la norma.

7.1.7. Estados límite de servicio

Una vez realizadas las verificaciones para los estados límites últimos, se deben comprobar los estados límite de servicio.

Flecha

Se verificarán los desplazamientos verticales del puente para las vigas principales y viguetas según lo indicado en el Eurocódigo 5:1995-2.

Vigas

La flecha admisible adoptada es,

$$\omega_{adm} = \frac{L_{puente} (mm)}{400}$$

Operando se obtiene,

$$\omega_{adm} = \frac{15000 \text{ mm}}{400} = 37,5 \text{ mm}$$

Por otra parte, la flecha del puente será,

$$\omega_{final} = \omega_{creep} + \omega_{instantánea}$$

Donde,

$\omega_{instantánea}$ es la flecha instantánea generada por la carga.

ω_{creep} es la flecha diferida que se obtiene por,

$$\omega_{creep} = \omega_{instantánea} \cdot k_{def}$$

Siendo k_{def} un factor que depende de la clase de servicio y la duración de la carga. Para la clase de servicio utilizada, k_{def} será igual a 2 si se trata de cargas permanentes e igual a 0,3 para cargas de corta duración. La Tabla 7.20 muestra las expresiones para la flecha diferida en los distintos estados de carga considerados.

Tabla 7.20: Fórmulas utilizadas para hallar la flecha diferida en los distintos estados de carga.

Estado	Flecha Diferida
1	$2 \cdot \omega_{inst-PP}$
2	$2 \cdot \omega_{inst-PP} + 0,3 \cdot (\omega_{inst-peatones} + \omega_{inst-autos} + \omega_{inst-camión-medio})$
3	$2 \cdot \omega_{inst-PP} + 0,3 \cdot (\omega_{inst-peatones} + \omega_{inst-autos} + \omega_{inst-camión-punta})$

Los valores de la flecha instantánea ($\omega_{instantánea}$) se obtienen a partir del modelo computacional utilizado para modelar el puente.

Finalmente, la Tabla 7.21 presenta valores para las flechas diferida e instantánea y la suma de éstas en los distintos estados de carga.

Tabla 7.21: Vigas. Flechas obtenidas para los distintos estados de carga.

<i>Estados</i>		1	2	3
<i>Flecha instantánea (mm)</i>	$\omega_{instantánea}$	8	32	23
<i>Flecha diferida (mm)</i>	ω_{creep}	16	23,20	20,50
<i>Flecha final (mm)</i>	ω_{final}	24	55,20	43,50

La flecha diferida máxima supera la admisible, es por ello que se proponen dos soluciones para que se verifique la misma. Una de ellas es aumentar la inercia de las vigas, aumentando su sección o directamente cambiando la geometría de ellas. La otra solución posible es darle a las vigas una contraflecha (ω_c) de forma tal que la flecha final este dentro de los valores admisibles.

Si se opta por la segunda opción, basta con que la misma sea de 20mm para obtener lo siguiente,

$$\omega_{final} = \omega_{creep} + \omega_{instantánea} - \omega_c$$

$$\omega_{final} = 23,2mm + 32mm - 20mm = 35,2mm < 37,5mm$$

Viguetas

Realizando un procedimiento análogo al de las vigas pero considerando como flecha admisible,

$$\omega_{adm} = \frac{L_{puente} (mm)}{500}$$

Se obtiene,

$$\omega_{adm} = \frac{5000 mm}{500} = 10 mm$$

Tabla 7.22: Viguetas. Flechas obtenidas para los distintos estados de carga.

<i>Estados</i>		1	2	3
<i>Flecha instantánea (mm)</i>	$\omega_{instantánea}$	0,2	0,71	2,8
<i>Flecha diferida (mm)</i>	ω_{creep}	0,4	0,55	1,18
<i>Flecha final (mm)</i>	ω_{final}	0,6	1,26	3,98

La flecha máxima en una vigueta se considera como la diferencia entre el punto de mayor descenso y el de menor descenso. Teniendo en cuenta esto la Tabla 7.22 presenta los valores de flecha máximos obtenidos para cada estado de carga. Estos

son menores que los admisibles por lo tanto, la sección considerada verifica el estado límite de deformaciones.

Frenado

Otra de las verificaciones a realizarle a la estructura es la de la fuerza de frenado producida por los vehículos. Esta verificación es necesaria ya que al frenar, los vehículos ejercen una fuerza horizontal sobre la estructura que es trasladada a los apoyos y si ésta no es tenida en cuenta en el diseño, puede llegar a producir deformaciones excesivas o incluso fallas en la estructura.

Para la estimación de esta fuerza se utiliza el Pliego General de Condiciones para la Realización de Proyectos de Puentes del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (Decreto N°9/990, 1990). El mismo propone considerar una fuerza horizontal distribuida por unidad de superficie que es aplicada sobre toda la carpeta. El valor de esta fuerza es igual a la cuarta parte de la fuerza vertical correspondiente a los vehículos.

A la hora de considerar la fuerza vertical se tienen dos tipos de carga, una correspondiente a los autos y otra, un poco mayor, correspondiente al camión. Si bien lo que estipula el pliego sería considerar un estado de carga que combine los dos vehículos mencionados, para esta verificación se considerará una fuerza vertical como si el puente estuviera completamente cargado por camiones. Este aumento de carga se justifica porque, en la actualidad las tecnologías de frenado permiten hacerlo en distancias menores, reflejándose en fuerzas de frenado mayores.

$$F_{Camión} = \frac{\text{Peso}}{\text{Area de aplicacion}} = \frac{360kN}{6m \cdot 3m} = 20 \text{ kN/m}^2$$

Una vez que se tiene la fuerza vertical, se calcula la fuerza horizontal;

$$F_{Horizontal} = 0,25 \cdot F_{Camión} = 5 \text{ kN/m}^2$$

Considerando el puente como una estructura lineal la fuerza a utilizar para obtener su estiramiento es igual a;

$$F_{lineal} = F_{Horizontal} \cdot Ancho = 5 \text{ kN/m}^2 \cdot 3m = 15 \text{ kN/m}$$

Por último el estiramiento del puente frente a esta fuerza es,

$$\delta = \frac{F_{lineal} \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot A} = \frac{15 \text{ kN/m} \cdot (15m)^2}{2 \cdot (9.600.000 \text{ kN/m}^2) \cdot 2,07m^2} = 0,085mm$$

Siendo A la suma de las secciones de todas las vigas longitudinales.

El estiramiento hallado es muy pequeño por lo que en un principio no sería necesario considerar un diseño especial para los apoyos.

7.1.8. Estudio del viento sobre la estructura

Se utilizó para el cálculo del viento la norma europea IAP:2011.

Cálculo de los esfuerzos

Velocidad básica del viento

La velocidad básica del viento para un período de 50 años (en m/s) se define como;

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0}$$

Donde;

c_{dir} es el factor direccional del viento que a falta de estudios puede considerarse igual a 1.

c_{season} es el factor estacional del viento que, a falta de estudios, puede tomarse igual a 1.

$v_{b,0}$ es la velocidad básica fundamental del viento (en m/s). Esto es, la velocidad media del viento medida durante un período de 10 minutos en una zona plana y desprotegida frente al viento.

Conforme con lo sugerido por los Documentos Técnicos Base para la Normalización de Estructuras y Construcción con Madera (Baño et al., 2015) esta velocidad $v_{b,0}$ puede relacionarse con la velocidad característica del viento v_k , dada en la norma uruguaya de Acciones de Viento sobre las Construcciones (UNIT 50:1984) por la siguiente fórmula:

$$v_{b,0} = 0,667 v_k$$

Donde, v_k es la velocidad característica del viento en función de la zona geográfica de la construcción, y se define como la velocidad media de una ráfaga de 3 segundos de duración medida a 10 metros sobre la altura del terreno en campo plano, abierto y sin obstáculos que tiene una probabilidad de 0,05 de ser excedida en cualquier año (período de retorno $T=20$ años).

Para este caso se considerará que la estructura se encuentra ubicada a menos de 25 km de cualquier punto de los márgenes del Río Uruguay, Río de la Plata o costa Atlántica y por lo tanto será igual a:

$$v_k = 43,9 \text{ m/s}$$

Por lo anterior la velocidad básica con la que se trabajará será igual a:

$$v_{b,0} = 0,667 \times 43,9 \text{ m/s}$$

Esto es:

$$v_{b,0} = 29,28 \text{ m/s}$$

La velocidad básica del viento (en m/s) para un período de retorno distinto a los 50 años se define como;

$$v_b(T) = v_b c_{prob}$$

Donde c_{prob} es un factor de probabilidad

En este trabajo se considerará un tiempo de retorno igual a 50 años por lo que,

$$v_b(T) = 29,28 \text{ m/s}$$

Velocidad media del viento

La velocidad media $v_m(z)$ a una altura z sobre el terreno se determina según la siguiente expresión:

$$v_m(z) = c_r(z) c_0 v_b(T)$$

Depende de la rugosidad del terreno, de la topografía y de la velocidad básica del viento.

c_0 es el factor de topografía que se toma habitualmente igual a 1,0 salvo en algunos casos especiales explicitados en la norma.

$c_r(z)$ es factor de rugosidad obtenido de la siguiente fórmula,

$$c_r(z) = k_r \text{Ln} \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

z es la altura del punto de aplicación del empuje de viento (respecto del terreno o respecto del nivel mínimo del agua bajo el puente), se exige que $z \geq z_{min}$

k_r es el factor de terreno

z_0 es la longitud de la rugosidad

Los valores z_{min} , k_r y z_0 están tabulados y dependen del tipo de terreno. En el puente estudiado se considerará un entorno tipo II (zona rural con vegetación baja y obstáculos aislados, con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos) por lo que los valores con los que se trabajará serán:

$$k_r = 0,19, \quad z_0 = 0,05 \text{ m}, \quad z_{min} = 2,00 \text{ m}$$

Con los valores anteriores y considerando $z = 5\text{m}$ se llega a que;

$$c_r(z) = 0,87$$

Teniendo en cuenta además de lo anterior que $c_0 = 1$ se obtiene:

$$v_m(z) = 25,62 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Presión de la velocidad básica del viento

La misma puede determinarse a través de la expresión

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 (T)$$

Donde

ρ es la densidad del aire que se toma igual a $1,25 \text{ kg/m}^3$

Sustituyendo en la fórmula se obtiene:

$$q_b = 535,87 \text{ N/m}^2$$

Dirección de viento

Para evaluar la acción del viento sobre la estructura se considerará su actuación en dos direcciones (Figura 7.5):

- i. Perpendicular al eje del tablero: dirección transversal (X). Esta componente podrá ir acompañada de una componente asociada en dirección vertical (Z).
- ii. Paralela al eje del tablero: dirección longitudinal (Y).

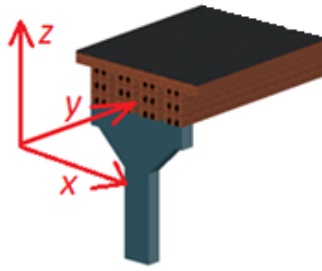


Figura 7.5: Ejes considerados para el estudio del viento sobre la estructura.

Empuje del viento

La magnitud del empuje del viento sobre cualquier elemento se calculará mediante la expresión:

$$F_w = q_b c_e(z) c_f A_{ref}$$

Donde,

F_w es el empuje horizontal del viento

q_b es la presión de la velocidad básica del viento

$c_e(z)$ es el coeficiente de exposición que se puede hallar a través de la siguiente expresión,

$$c_e(z) = k_r^2 \left(c_0^2 \ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 k_l c_0 \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right)$$

$z \geq z_{min}$ con el z_{min} hallado anteriormente

k_l es el factor de turbulencia que se toma igual a 1

c_f es el coeficiente de fuerza que depende de la geometría del elemento considerado.

A_{ref} es el área de la estructura sobre la cual incide el viento.

El empuje del viento se aplicará sobre el centro de gravedad del área de referencia del elemento A_{ref} .

Se supondrá que el efecto de la sobrecarga de uso equivale a un área expuesta, cuya altura se considerará igual a 2m en puentes vehiculares.

Dichas alturas se medirán desde la superficie del pavimento y se tendrán en cuenta para el cálculo tanto del coeficiente de fuerza, como del área. En el caso de

coexistir distintos tipos de carga sólo se considerará aquella que genere la altura más desfavorable.

En el estudio del puente, q_b es la hallada anteriormente, mientras que c_f y A_{ref} dependerán de la dirección en la que se esté estudiando el viento.

Luego, para hallar el coeficiente de exposición en función de la altura $c_e(z)$, se sustituyen los datos presentados anteriormente teniendo en cuenta además que $k_l = 1$ obteniéndose:

$$c_e(z) = 1,33$$

Empuje del viento sobre tableros

Empuje horizontal (según X)

$$F_{w,x} = q_b c_e(z) c_{f,x} A_{ref,x}$$

Para los cálculos del empuje transversal (dirección X) sobre tableros de alma llena se tiene,

$c_{f,x}$ es el coeficiente de fuerza en la dirección x y se determinará mediante la expresión,

$$c_{f,x} = 2,5 - 0,3 \left(\frac{B}{h_{eq}} \right)$$

Donde

B es el ancho total del tablero

h_{eq} es la altura obtenida considerando, además del propio tablero, la altura de cualquier elemento no estructural que evite el paso del viento o, si se tiene en cuenta la presencia de la sobrecarga de uso, la altura de ésta, en caso de ser más desfavorable.

El coeficiente se limita por los siguientes valores,

$$1,3 \leq c_{f,x} \leq 2,4$$

El área de referencia es el producto de la longitud del tramo de puente considerado por la altura equivalente h_{eq} ,

$$A_{ref,x} = L h_{eq}$$

Para el puente estudiado se tiene una luz $L = 15 \text{ m}$ y un ancho $B = 5 \text{ m}$ y la altura de la sobrecarga será de $h_{SU} = 2 \text{ m}$.

La altura equivalente se esquematiza en la Figura 7.6 y estará dada por:

$$h_{eq} = h_{vigas} + h_{viguetas} + h_{carpeta,asfáltica} + h_{SU}$$

Y será igual a:

$$h_{eq} = 0,95\text{m} + 0,25\text{m} + 0,05\text{m} + 2\text{m}$$

$$h_{eq} = 3,25 \text{ m}$$

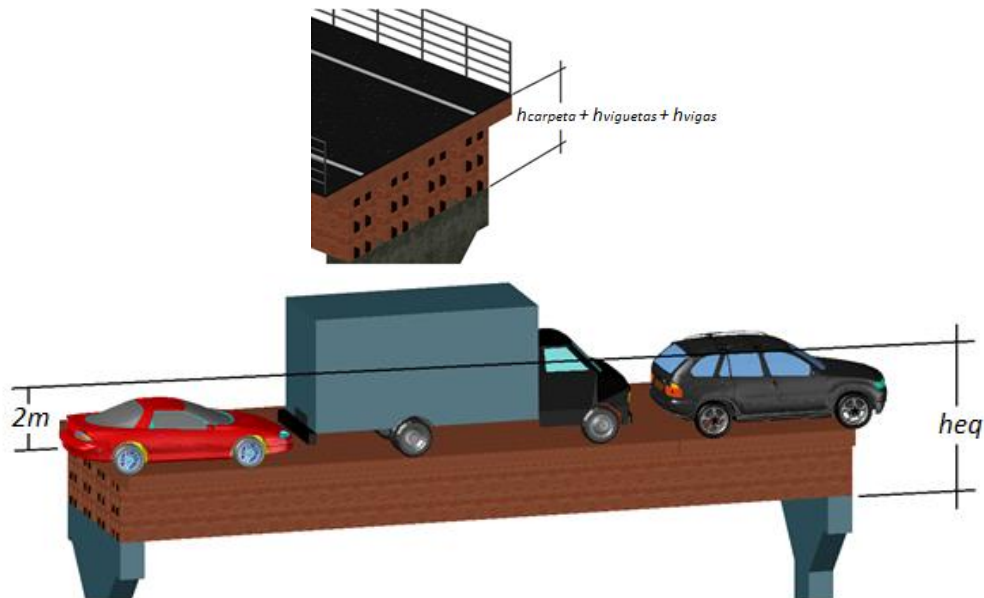


Figura 7.6: Altura equivalente considerada para obtener el empuje horizontal del viento.

Por lo que;

$$c_{f,x} = 2,04$$

Y además:

$$A_{ref} = 48,75 \text{ m}^2$$

Con los valores anteriores se obtiene:

$$F_{w,x} = 70,82 \text{ kN}$$

Empuje vertical según (Z)

Se considerará un empuje vertical, en la dirección Z, sobre el tablero actuando en el sentido más desfavorable, igual a:

$$F_{w,z} = q_b c_e(z) c_{f,z} A_{ref,z}$$

$c_{f,z}$ es el coeficiente de fuerza en la dirección vertical Z, que se tomará igual a $\pm 0,9$

En este caso el área de referencia corresponde a la planta del tablero,

$$A_{ref} = 15 \times 5 \text{ m}^2 = 75 \text{ m}^2$$

Con los valores anteriores se obtiene:

$$F_{w,z} = 48,11 \text{ kN}$$

Verificaciones

Con los valores obtenidos se procede a verificar la capacidad resistente del puente, los mismos son:

$$F_{w,x} = 70,82 \text{ kN}$$

$$F_{w,z} = 48,11 \text{ kN}$$

Momento de vuelco sobre el tablero

El momento de vuelco es ejercido por la acción combinada de los empujes transversal (dirección X) y vertical (dirección Z) de viento sobre el tablero.

Se supondrá que el empuje transversal en tableros de alma llena se medirá desde la base del tablero y estará aplicado al 60% de la altura del primer frente máximo adoptado en el cálculo del área expuesta. Además, en tableros de alma llena, el empuje vertical está aplicado a una distancia del borde de barlovento igual a un cuarto de la anchura del tablero. Resumiendo se obtiene el esquema de la Figura 7.7 siendo $L = 15 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$, $x = 1 \text{ m}$ y $h_{eq} = 3,25 \text{ m}$.

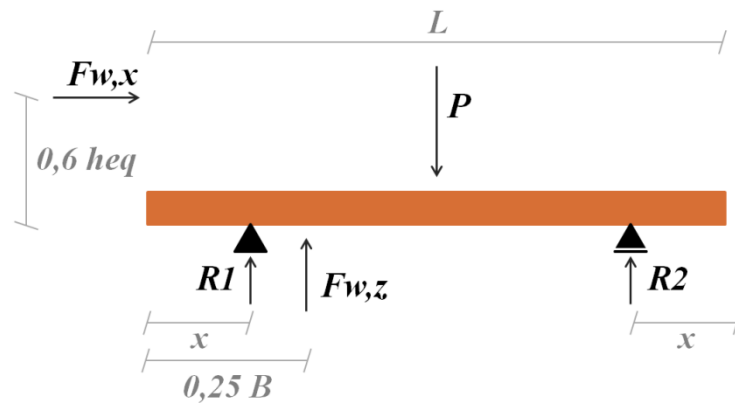


Figura 7.7: Fuerzas consideradas para realizar las verificaciones del viento sobre la estructura.

Para que el tablero no gire respecto al apoyo 2 se debe cumplir $R1 > 0$ o, lo que es lo mismo, que el momento estabilizador, causado por el peso P , sea mayor que el momento desestabilizador generado por las componentes transversal y vertical del viento.

Se observa que, el análisis del viento que incide sobre la estructura se estudió para el caso del puente cargado, esto aumenta la h_{eq} lo que aumenta por lo tanto los valores obtenidos para $F_{w,x}$ y $F_{w,z}$. Para realizar las verificaciones correspondientes al viento sobre la estructura, sin embargo, no se considerará la ayuda que ofrece el peso de la sobrecarga que reforzaría la fuerza “ P ” encargada de estabilizar el puente.

El peso del puente es de,

$$P = 248,75 \text{ kN}$$

Realizando equilibrio de momentos en el esquema de la Figura 7.7 y teniendo en cuenta los coeficientes de seguridad utilizados para las fuerzas de viento que son desfavorables ($\gamma = 1,5$) y las permanentes que son favorables ($\gamma = 1$) se llega a que el momento estabilizador, causado por la fuerza P es,

$$M_{est} = 1616,84 \text{ kNm}$$

Mientras que, el momento desestabilizador, causado por las fuerzas de viento,

$$M_{desest} = 1127,20 \text{ kNm}$$

El factor de seguridad obtenido es,

$$F.S. = 1,43$$

Desprendimiento del tablero por causa del esfuerzo vertical

En este caso la comprobación que debe efectuarse es que el peso del tablero sea mayor que el empuje vertical del viento. Nuevamente se utilizan los coeficientes $\gamma = 1,5$ para las fuerzas de viento que son desfavorables y $\gamma = 1$ para las fuerzas permanentes que son favorables, haciendo cálculos se lleva a que la fuerza estabilizadora causada por el peso de la estructura es,

$$F_{est} = 248,75 \text{ kN}$$

Mientras que, la fuerza desestabilizadora causada por el efecto vertical del viento es,

$$F_{desest} = 72,16 \text{ kN}$$

El factor de seguridad obtenido en este caso es;

$$F.S. = 1,92$$

Esfuerzo de corte en anclajes

Finalmente se desea verificar que los anclajes utilizados tienen la capacidad de resistir los esfuerzos de corte causados por el efecto transversal del viento. Para esto se tiene en cuenta que cada una de las 4 vigas que constituyen el puente posee, un anclaje con 6 conectores SKR SKSCE en cada uno de sus extremos como puede observarse en la Figura 7.8.

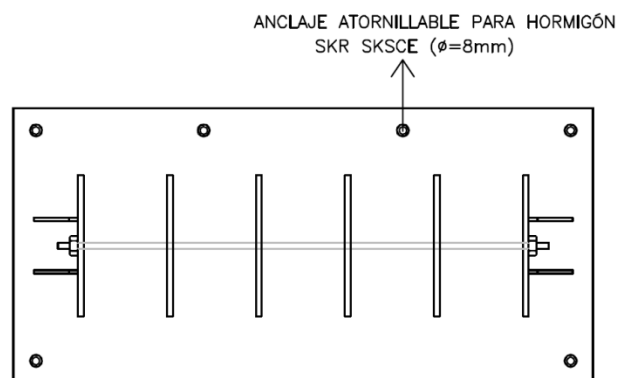


Figura 7.8: Conectores utilizados para el anclaje del puente.

Por lo anterior se tiene que el viento transversal que solicita al puente se divide en un total de:

$$6_{conectores} \times 4_{vigas} \times 2_{extremos} = 48_{conectores}$$

El esfuerzo por conector es de:

$$F_{por-conector} = \frac{1,5 F_{w,x}}{48}$$

Esto es;

$$F_{por-conector} = 2,21 \text{ kN}$$

Para el valor de la resistencia al corte de cada anclaje se utilizó el catálogo de Rothoblas (2017) que indica que para el conector SKR-SKSCE la misma es de $9,4 \text{ kN}$. Si se divide este valor por el coeficiente de seguridad de los materiales para el acero, se llega a que;

$$R_{conector} = 8,17 \text{ kN}$$

El factor de seguridad obtenido en este caso es;

$$F.S. = 3,69$$

Capítulo 8:

Conclusiones del Estudio de la Estructura

Luego de haber realizado el cálculo estructural de un puente de MLE de *E. grandis* se puede concluir que, dicha madera es apta para su uso en estructuras, incluso en aquellas sometidas a solicitaciones elevadas, como es el caso de un puente para tránsito pesado.

Es interesante mencionar que, con la madera se pudo conseguir una solución al problema que responde a las mismas exigencias normativas que con las que se dimensiona en hormigón y acero, posicionándola a la par de estos materiales constructivos.

Por otra parte, a diferencia de los materiales convencionalmente usados, se destaca lo esencial de conseguir una estructura que esté protegida por diseño frente a factores ambientales.

Se percibió luego de haber realizado los cálculos que, la geometría de las vigas es un factor de gran importancia al momento de diseñar la estructura. Esto se debe a que la resistencia es muy sensible a variaciones en disposición y tamaño de las piezas.

Capítulo 9:

Referencias Bibliográficas

9.1. Textos

- Abrahamsen, R. B., & Malo, K. A. (2014).** Structural Design and Assembly of “Treet” - a 14- Storey Timber Residential Building in Norway. WCTE 2014 - World Conference on Timber Engineering, Proceedings 2014, 22(April 2014), 3–10.
- Argüelles, R., & Arriaga, F. (1996).** Estructuras de Madera. Madrid: Gráficas Palermo, S.L.
- Bakar. (2003).** Plaster PUR-20 Estructuras. Boletín técnico. Retrieved from <http://www.bakar.es/images/stories/pdf/pur-20.pdf>
- Baño, V., Moya, L., O’Neill, H., Cardoso, A., Cagno, M., Cetrangolo, G., & Domenech, L. (2016).** Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera. Montevideo: Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería.
- Baño, V., Vega, A., Godoy, D., Mazzey, C., Arrejuiria, S., & Planchón, C. (2015).** Ensayos de propiedades mecánicas de madera aserrada de Eucalyptus Grandis de procedencia uruguaya. La casa uruguaya. Casa solar Decathlon 2015., (598), 13.
- Baño, V., & Moya, M. L. (2015).** Pliego de condiciones técnicas para la madera estructural en la edificación en Uruguay. Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería. Montevideo.
- Baño, V., Vega, A., Mazzey, C., & María Laura, M. (2017).** Fabricación de un prototipo de puente vehicular a partir del desarrollo de productos de ingeniería de madera de pino uruguayo (p. 11). Junín, Buenos Aires: ResearchGate. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/317278894%0AFabricación>
- Böthing, S., Sánchez, A., & Doldán, J. (2008).** Durabilidad natural de madera de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden de plantaciones de rápido crecimiento. Departamento de Proyectos Forestales, Laboratorio Tecnológico del Uruguay. INNOTEC, (3), 7–16.
- Cuadrado, J., Zubizarreta, M., Pelaz, B., & Marcos, I. (2015).** Methodology to assess the environmental sustainability of timber structures. Construction and

Building Materials, 86, 149–158.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.109>

de la Lama Gutierrez, G. (1982). Atlas del Eucalipto. Tomo I. (S. . OFFO, Ed.). Madrid.

dos Anjos, M., & Alves, A. (2006). Use of castor oil-based polyurethane adhesive in the production of glued laminated timber beams. *Materials Research*, 9(3), 287–291. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000300008>

García, R. (2013). Diseño y comportamiento de uniones estructurales mecánicas y adhesivas. Condiciones superficiales y operacionales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.

Guindos, P., & Guaita, M. (2013). A three-dimensional wood material model to simulate the behavior of wood with any type of knot at the macro-scale. *Wood Science and Technology*, 47(3), 585–599.
<https://doi.org/10.1007/s00226-012-0517-4>

Iraola, B., & Cabrero, J. M. (2016). An algorithm to model wood accounting for different tension and compression elastic and failure behaviors. *Engineering Structures*, 117, 332–343. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.021>

Ley Forestal. Ley N°15939 (1988). Montevideo: Poder Legislativo de la República Oriental del Uruguay.

Mantero, C. (2005). Aptitud de uso de la madera de los eucaliptos colorados para carpintería en obra. *Edificar. Revista de Arquitectura Y Construcción*, 14.

MGAP, & OPYPA. (2015). El desarrollo agropecuario y agroindustrial de Uruguay opypa Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca., 86.

Moya, L., Cardoso, A., & Cagno, M. (2015). Carcaterización de madera aserrada de pinos cultivados e Uruguay. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, 17(3), 597–612. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000053>

Patton-Mallory, M., Cramer, S. M., Smith, F. W., & Pellicane, P. J. (1997). Nonlinear Material Models for Analysis of Bolted Wood Connections. *Journal of Structural Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:8\(1063\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:8(1063))

Perera, G. (2011). Probabilidad y Estadística. Fin de Siglo.

Pérez Gomar, M. C. (2017). Optimización del proceso productivo de vigas de madera laminada encolada para uso estructural. El caso de una empresa en Uruguay. Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile.

- Pérez Zerpa, J. M., Castrillo, P., & Baño, V. (2017).** Development of a method for the identification of elastoplastic properties of timber and its application to the mechanical characterisation of *Pinus taeda*. *Construction and Building Materials*, 139, 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.058>
- Piter, J. C., Cotrina, A. D., Sosa Zitto, M. A., Stefani, P. M., & Torrán, E. A. (2007).** Determination of characteristic strength and stiffness values in glued laminated beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* according to European standards. *Holz Als Roh - Und Werkstoff*, 65, 261–266. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0161-5>
- Puy, M. (2015).** Aplicación de la teoría Zig-Zag Refinada para el análisis de vigas Laminadas de Madera. Escola de Camins, UPC Barcelona.
- Ramage, M. H., Burridge, H., Busse-wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U. Scherman, O. (2016).** The wood from the trees : The use of timber in construction. Elsevier, 68(September 2016), 333–359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- Sánchez, M. (1995).** Experiencia argentina en el uso de la madera de eucalipto. In *Seminário Internacional de Utilização da Madeira de Eucalipto para Serraria*. (p. 18). Sao Pablo.
- Somoza, L. (1986).** La Madera laminada encolada: Historia y Definición. Escola Técnica Superior de Arquitectura da Coruña (Vol. 5).
- Thelandersson, S., & Larsen, H. J. (2003).** *Timber Engineering*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Ugalde, L., & Pérez, O. (2001).** Mean annual volume increment of selected industrial forest plantation species (No. 1). Roma.
- Vignote, S., & Martinez Isaac. (2006).** *Tecnología de la Madera* (3rd ed.). Madrid: S.A Mundi-Prensa Libros.
- Decreto N°9/990. (1990).**
- Caracterización de la forestación en Uruguay. (2011).** Rosario Pou & Asociados. Montevideo.

9.2. Normativa

- **EN 338:2016.** Madera estructural. Clases resistentes
- **EN 384:2016.** Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad.
- **EN 408:2011.** Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas
- **EN 14080:2013.** Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos
- **EN 14358:2016.** Estructuras de madera. Determinación y verificación de los valores característicos.
- **EN 1995-1-1:2006.** Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- **EN 1995-2:2006.** Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes
- **IRAM 9660-1:2005.** Vigas laminadas de madera. Requisitos de fabricación y control.
- **IRAM 9662-2:2006.** Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia.
- **IAP 2011.** Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera.

Anexo A:

Deducción ecuación del Módulo de elasticidad según la teoría de viga de Timoshenko (Baño et. al, 2016).

Cuando se considera el efecto de la fuerza cortante en la deformación de la viga, se produce una deformación adicional como consecuencia del deslizamiento relativo de las secciones adyacentes. Este efecto es introducido por Timoshenko en la ecuación de la viga:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{EI_z} \left(M + \frac{\alpha EI_z}{AG} q \right)$$

Siendo:

- y la flecha vertical para cada coordenada x .
- E el módulo de elasticidad lineal del material.
- G el módulo de elasticidad transversal del material.
- A el área de la sección constante.
- I_z la inercia según el eje perpendicular a x e y .
- q la carga distribuida aplicada.
- M el momento flector que produce la carga q .
- α un coeficiente por el que hay que multiplicar la tensión rasante media para obtener la tensión rasante en el centro de gravedad, que para una sección rectangular vale 5/6

Esta ecuación puede emplearse para determinar las deformaciones en aquellos casos en los que deba considerarse el efecto de la fuerza cortante. El primer sumando considera la deformación por flexión mientras que el segundo la deformación por cortante. Cuando no se tiene en cuenta la deformación por cortante se elimina el segundo sumando quedando la ecuación de viga tradicional, representada por:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI_z}$$

Aplicando la primera ecuación a la configuración geométrica del ensayo a cuatro puntos, resulta que la flecha máxima en la sección central de la viga es:

$$y = y_E + y_G = \frac{Pa}{24E_l I_z \cdot (3L^2 - 4a^2)} + \frac{6}{5} \cdot \frac{Pa}{AG}$$

Siendo:

- y_E la flecha debida a la flexión.
- y_G la flecha debida al cortante.
- E_l el módulo de elasticidad lineal local.
- P la carga aplicada en cada uno de los dos puntos de aplicación.
- a es la distancia entre los puntos de apoyo y cada una de las cargas.
- L es la luz entre puntos de apoyo.

Por otra parte, la flecha máxima en la sección central puede despejarse de la segunda ecuación, utilizando el módulo de elasticidad global de la viga, resultando:

$$y = \frac{Pa}{24E_g I_z \cdot (3L^2 - 4a^2)}$$

Siendo E_g el módulo de elasticidad lineal global de la viga.

Igualando las últimas dos ecuaciones y despejando la inercia (I_z) y el área (A) en función de las dimensiones de la sección rectangular, puede despejarse el módulo de elasticidad local (E_l) en función del módulo de elasticidad global (E_g):

$$E_l = \frac{5(3L^2 - 4a^2)}{15L^2 - 20a^2 - 12h \cdot \frac{E_g}{G}} \cdot E_g$$

Siendo

- b el canto de la sección rectangular.
- h la altura de la sección rectangular.

A su vez, puede despejarse una ecuación que no contenga el módulo de elasticidad global como variable. La misma es mostrada a continuación:

$$E_l = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(\frac{y}{P} - \frac{6a}{5Gb^2h} \right)}$$

Se aprecia que queda como parámetro la pendiente entre la flecha y la carga aplicada. Por este motivo, se plantea una manera alternativa de expresar la

pendiente que no afecta la igualdad de la ecuación. A su vez, se introduce la variable de la fuerza total aplicada (F) en lugar de la carga aplicada en cada uno de los puntos (P). Entonces:

$$y = w_2 - w_1$$

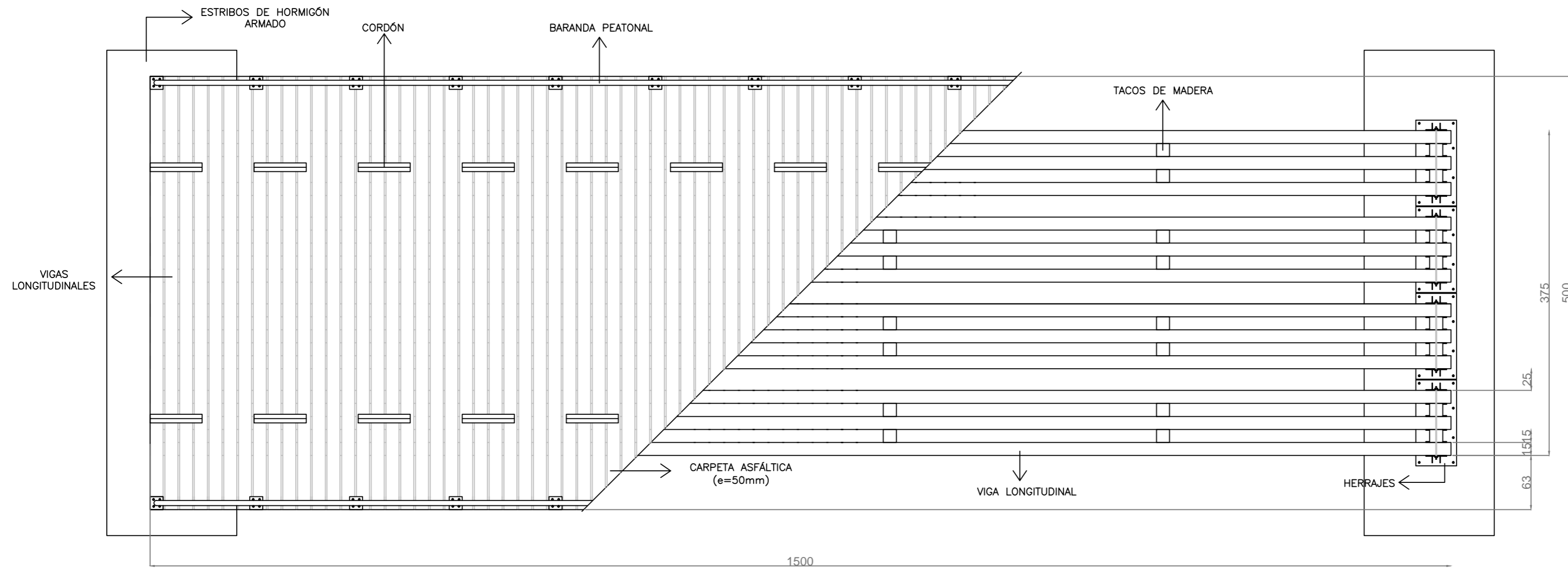
$$P = \frac{F_2 - F_1}{2}$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores, el módulo de elasticidad local coincide con la ecuación de la norma EN 408:

$$E_l = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h} \right)}$$

Anexo B: Planos de la estructura

SECCIONES EN PLANTA
ESCALA 1:40
MEDIDAS EN MILIMETROS



CLASE RESISTENTE DE LA MADERA LAMINADA

Todos los elementos estructurales serán asimilables, como mínimo, a la clase resistente GL24h, según UNE EN 14080:2013

RESISTENCIAS CARACTERÍSTICAS, CLASE GL24h

Flexión:	24 N/mm ²
Compresión paralela:	24 N/mm ²
Compresión perpendicular:	2,5 N/mm ²
Tensión paralela:	19,2 N/mm ²
Tensión perpendicular:	0,5 N/mm ²
Cortante:	3,5 N/mm ²
Módulo Elástico Medio:	11500 N/mm ²
Densidad Media:	420 kg/m ³

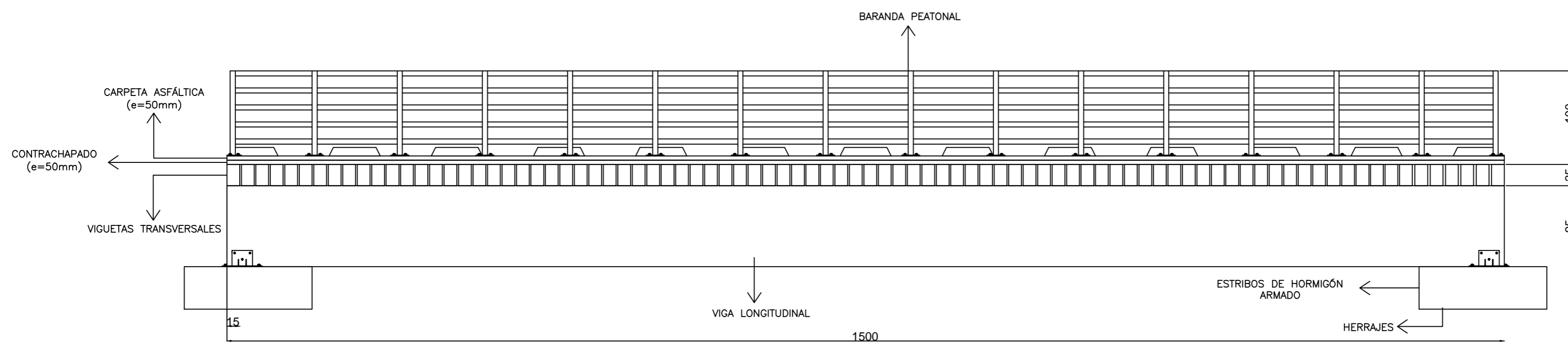
ELEMENTOS DE MADERA

NOMBRE	MATERIAL	ANCHO(mm)	ALTO(mm)	LARGO(mm)
Viga Longitudinal	GL24h	150	950	15000
Vigueta Transversal	GL24h	150	250	5000
Riostra		60	100	1000
Tacos		150	150	150

OTROS

Un contrachapado de 50mm de espesor y una carpeta asfáltica de 50 mm de espesor recubrirán todo el tablero del puente

SECCIÓN LONGITUDINAL
ESCALA 1:40
MEDIDAS EN MILIMETROS



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

PROYECTO: Puente peatonal y vehicular

LÁMINA: Secciones Longitudinal y en Planta

EQUIPO DE TRABAJO:
Ricardo Cerviño
Karen García
Cecilia Volpe

TUTOR:
Dra. Ing. Vanesa Baño
CO-TUTOR:
Dr. Ing. Abel Vega
REFERENTE EXTERNO:
PhD. Arq. Laura Moya

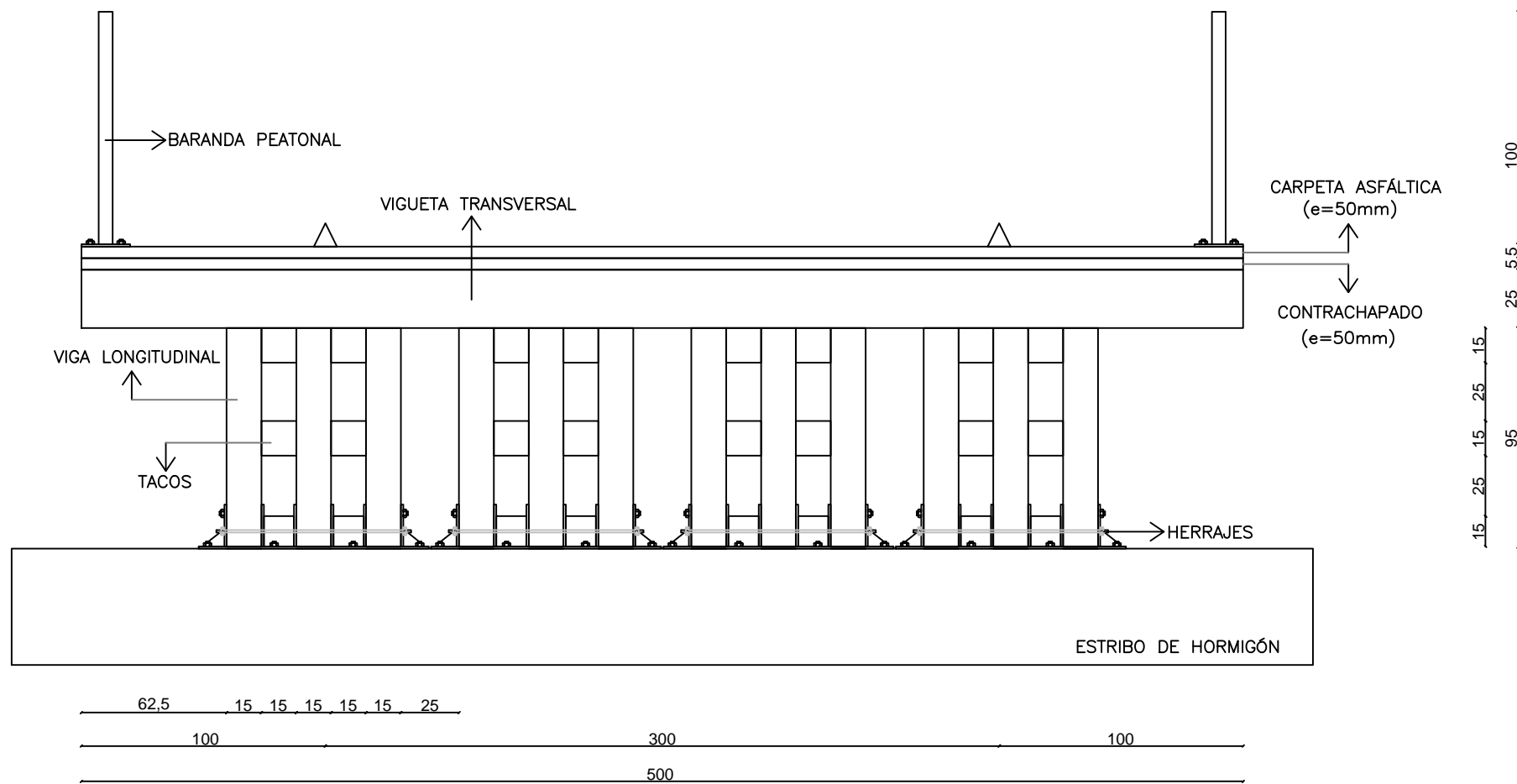
FECHA: 31/08/2017

PLANO

ESCALAS:
Se especifican en el plano

01

SECCIÓN TRANSVERSAL
ESCALA 1:25
MEDIDAS EN MILIMETROS



CLASE RESISTENTE DE LA MADERA LAMINADA

Todos los elementos estructurales serán asimilables, como mínimo, a la clase resistente GL24h, según UNE EN 14080:2013

RESISTENCIAS CARACTERÍSTICAS, CLASE GL24h	
Flexión:	24 N/mm ²
Compresión paralela:	24 N/mm ²
Compresión perpendicular:	2,5 N/mm ²
Tracción paralela:	19,2 N/mm ²
Tracción perpendicular:	0,5 N/mm ²
Cortante:	3,5 N/mm ²
Módulo Elástico Medio:	11500 N/mm ²
Densidad Media:	420 kg/m ³

ELEMENTOS DE MADERA

NOMBRE	MATERIAL	ANCHO(mm)	ALTO(mm)	LARGO(mm)
Viga Longitudinal	GL24h	150	950	15000
Vigueta Transversal	GL24h	150	250	5000
Riostra		60	100	1000
Tacos		150	150	150

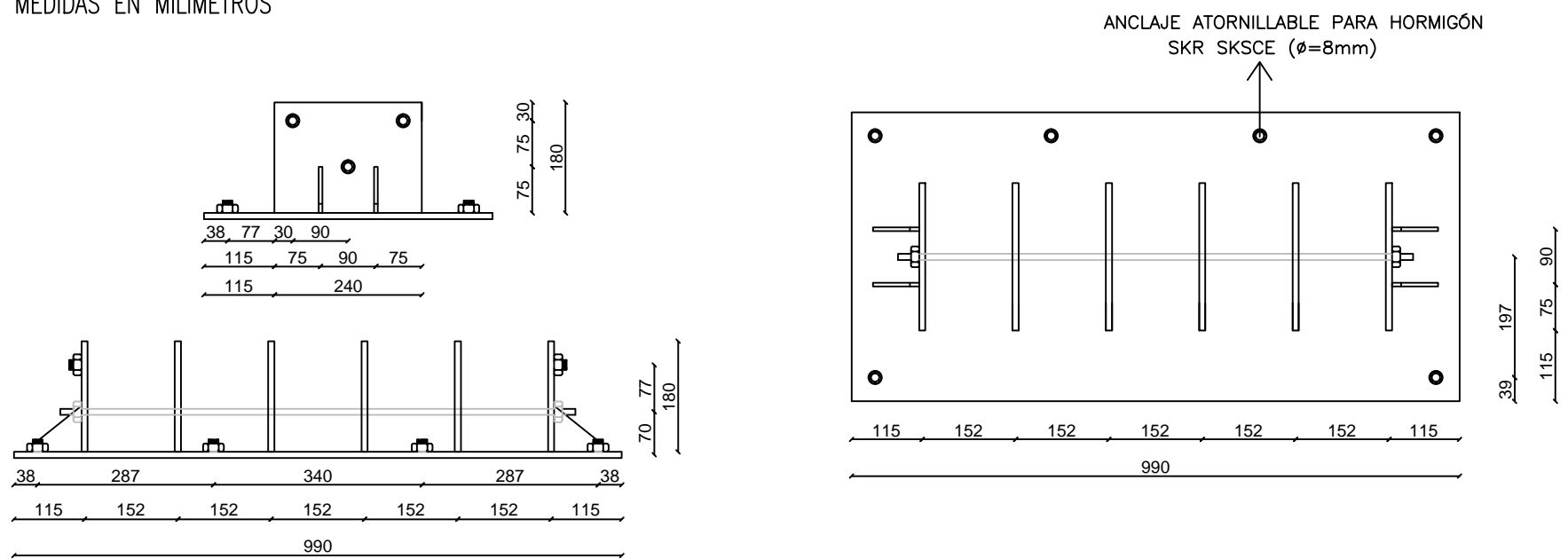
OTROS

Un contrachapado de 50mm de espesor y una carpeta asfáltica de 50 mm de espesor recubrirán todo el tablero del puente

CALIDAD DE ELEMENTOS DE TORNILLERÍA

Los aceros a emplear serán de calidad S-275-JR de límite elástico 240 N/mm², según norma EN-1025. Como protección de los herrajes se empleará el galvanizado en caliente.

DETALLE DE HERRAJE
ESCALA 1:10
MEDIDAS EN MILIMETROS



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

PROYECTO:
Puente peatonal y vehicular

LÁMINA:
Sección Transversal y Herraje

EQUIPO DE TRABAJO:
Ricardo Cerviño
Karen García
Cecilia Volpe

TUTOR:
Dra. Ing. Vanesa Baño
CO-TUTOR:
Dr. Ing. Abel Vega
REFERENTE EXTERNO:
PhD. Arq. Laura Moya

FECHA:
31/08/2017

ESCALAS:
Se especifican en el plano

PLANO
02