

# AGREGADO DE VALOR A MADERA SÓLIDA DE PRODUCCIÓN NACIONAL MEDIANTE CURVADO POR PLASTIFICADO HIGROTÉRMICO

Trabajo de grado para obtener el título de Diseñador Industrial  
Sebastián Cervetto  
2014-2015

Escuela Universitaria Centro de Diseño  
Facultad de Arquitectura  
Universidad de la República  
Montevideo, Uruguay  
2014-2015

### Trabajo de grado para obtener el título de Diseñador Industrial

Agregado de valor a madera sólida de producción nacional mediante  
curvado por plastificado higrotérmico

#### Autor

Br. Sebastián Cervetto

#### Tutor

D.I. Daniell Flain

#### Co tutores

Lic. Marcelo Patiño

Ing. Agr. Andrés Dieste



Este documento es el informe de la tesis de grado para la obtención del título de Diseñador Industrial de Sebastián Cervetto, en la Escuela Universitaria Centro de Diseño (EUCD) de la Facultad de Arquitectura (FARQ), Universidad de la República (UDELAR), Montevideo, Uruguay, 2014 - 2015.

Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional\*, la cual permite la distribución del documento y su copia, en cualquier formato y por cualquier medio. A su vez, permite la creación de obras derivadas. Ambas atribuciones pueden tomarse siempre que esto se realice sin fines comerciales y citando al autor.

\*Mas información sobre esta licencia en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/> [Consulta: 5 junio 2015]

# AGREGADO DE VALOR A MADERA SÓLIDA DE PRODUCCIÓN NACIONAL MEDIANTE CURVADO POR PLASTIFICADO HIGROTÉRMICO

Sebastián Cervetto



Escuela Universitaria  
Centro de Diseño

**farq** | uruguay  
facultad de arquitectura/universidad de la república



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# RESUMEN

El curvado de madera es un proceso de transformación de material capaz de generar productos diferenciados con alto valor agregado.

En comparación con otras tecnologías de mecanizado, el curvado de la madera permite un ahorro considerable en material y energía, minimiza el desperdicio de material, el proceso es rápido y puede realizarse con herramientas simples. La resistencia mecánica y elástica es mayor comparativamente en piezas curvadas que en piezas semejantes obtenidas por otros tipos de mecanizados.

Sin embargo, no se conocen aplicaciones de esta tecnología en maderas de producción nacional, fuera de la industria naval liviana; tampoco se conocen investigaciones ni registros sobre la aptitud de estas especies al curvado.

En un escenario previsto de abundancia de materia prima de calidad; evidente desarrollo profesional en diseño y capacidades tecnológicas y productivas instaladas, se espera que el estudio de la aptitud al curvado de maderas nacionales aporte al conocimiento sobre la caracterización del proceso de curvado de los dos géneros maderables con proyección de mayor producción para los próximos 15 años; así mismo, se espera que sea de subsidio al sector madera-diseño para favorecer la generación de productos diferenciados y de alto valor agregado.

Para el presente trabajo se desarrollaron y construyeron una cámara de vaporización de baja presión y un sistema de flexado mecánico de radios variables, para el plastificado y el curvado de las muestras.

El radio mínimo de curvatura para escuadrias de pino de 20mm de sección, con contenido de humedad de 20%, se estima en 60cm. Los resultados obtenidos no son concluyentes respecto la definición del radio mínimo de curvatura para las muestras de pino.

No fue posible, en las condiciones del proyecto, estimar un radio mínimo para el eucalipto. Se confirmó la hipótesis que este género presenta menor aptitud para el curvado que el pino, por lo que el radio mínimo de curvatura será mayor a 60cm.

Con los resultados obtenidos se proyecta un diseño de producto en pino que explote las cualidades de la tecnología y las características del material.

# AGRADECIMIENTOS

A:

Andrés Parravicini  
Daniell Flain  
Andrés Dieste  
Nazario Petra  
María Esther Fernández (LABIC, Farq)  
María Calone (LABIC, Farq)  
Paulo Pereira (LabFab, Farq)  
Elisa García Cavagnaro (El Puntal)  
Beatriz Amorin  
Sabrina Cervetto  
Federico Andrade  
Joaquín Díaz  
Huber Cervetto  
Gladys Manciameli  
Vera Alaniz

Quienes hicieron posible con sus aportes  
la realización de este proyecto.

Y, muy especialmente, a Marcelo Patiño,  
por su guía, amistad y compañía profesional incondicionales.

# ÍNDICE

Introducción	9
<b>CAPÍTULO I: PLANTEO DEL PROBLEMA</b>	<b>12</b>
1.1 Contexto	13
1.2 Objetivos	15
1.3 Beneficios esperados	16
1.4 Limitantes	16
<b>CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1 Antecedentes	18
2.2 Marco teórico	20
2.3 Hipótesis	29
2.4 Variables	29
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA</b>	<b>30</b>
3.1 Desarrollo metodológico	31
3.2 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	32
3.3 Cámara de vaporización	34
3.4 Sistema de flexado	36
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO V: DISCUSIÓN</b>	<b>45</b>
5.1 Discusión del proceso	46
5.2 Discusión de resultados	50

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	52
CAPÍTULO VII: APLICACIÓN	55
Referencias bibliográficas	59
Glosario	61
Índice de figuras	62
Índice de tablas	63
Anexos	64

# INTRODUCCIÓN

La tecnología de plastificado de la madera, como práctica industrial, es conocida como curvado. En comparación con otras tecnologías de mecanizado, el curvado de la madera permite un ahorro considerable en material y energía, minimiza el desperdicio de material, el proceso es rápido y puede realizarse con herramientas simples. Además, la resistencia mecánica y elástica es mayor comparativamente en piezas curvadas que en piezas semejantes obtenidas por otros tipos de mecanizados (OLGUÍN, SOTOMAYOR; 2013 y LEMOINE, KOCH; 1971).

En mobiliario, la tecnología del curvado tiene sus primeros antecedentes a principios del siglo XIX, con Joseph Chapuis y Samuel Gragg. Gragg patenta en 1808 el prototipo "Elastic chair" en madera maciza curvada. Pero es Michael Thonet quien a fines del siglo XIX marca un hito en la historia de la producción y el curvado de madera, patentando una técnica que permitió la industrialización y la producción en serie de sillas (ARAYA. 2005). "En 1860, por ejemplo, el modelo más conocido de la empresa, la silla N° 14, costaba menos que una botella de vino. Y en 1891 se había vendido ya la asombrosa cantidad de 7.300.00 de estas omnipresentes sillas de café" (FIELL y FIELL. 2005, Pág. 690).



FIGURA 1. Elastic chair.  
Fuente: [www.carnegiemuseums.org](http://www.carnegiemuseums.org)

Las investigaciones sobre curvado de madera son de larga data: Stevens y Turner (1948); Kollmann y Cote (1968); Peck (1968), entre otros (LEMOINE y KOCH. 1971). Araya (2005. Chile), determinó las características de curvado de madera sólida de Lenga y Tepa por plastificado higrotérmico. Lo mismo Gatto (2006. Brasil), para las especies *Luehea divaricata*, *Carya illinoensis* y *Platanus x acerifolia*; Olguin y Sotomayor (2013. Méjico), para el *Quercus scytophylla*.

A nivel nacional, la única referencia en investigación de curvado de madera es de Nicola y Menini (2011) quienes estudiaron las posibilidades de curvado en seco del finger joint de *Eucalyptus grandis*; y el trabajo monográfico de Chaves (2014): "Revisión bibliográfica sobre curvado de madera".

El curvado de madera es un proceso de transformación de material capaz de generar productos diferenciados con alto valor agregado. Ejemplo de ello, a nivel de mobiliario, son los productos desarrollados por diversos profesionales uruguayos, muchos de los cuales han sido reconocidos y premiados a nivel internacional.



FIGURA 2. Productos de multilaminado curvado.  
 Izq. VEO, cen. PERKINS (Selección concurso A Design Awards. Milán, Italia. 2014). Ana Sosa y Guillermo Salhón. Fuente: <http://estudio-diario.com>. Der. CUAC (Premio concurso CETEM. España. 2014). Rosina Secondi. Fuente: <https://www.facebook.com/Estudio-Claro>

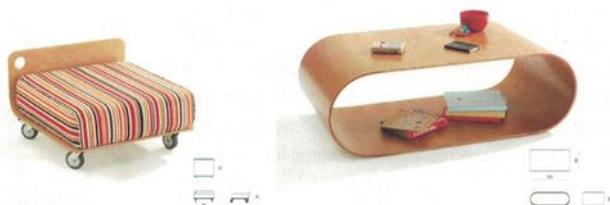


FIGURA 3. Productos de multilaminado curvado.  
 Izq. CHATO (Mención concurso Saleo Design. Brasil. 2008). Der. JESSIE. (2008). Agustín Menini y Carlo Nicola. Fuente: <http://menini-nicola.com>

Estos productos fueron fabricados utilizando la tecnología del curvado laminar, con chapas importadas de multilaminado de guatambú.

En cuanto a curvado con madera sólida, podemos citar el trabajo de Aña Maggioli Giosa y Federico Mirabal Pietra, quienes fueron seleccionados para el Salón del mueble de Milán (Italia. 2010) con su producto Fly, una reposera fabricada en madera maciza de Haya de 18mm de espesor.



FIGURA 4. Reposera Fly.  
 Fuente: [www.8-8-f.blogspot.com](http://www.8-8-f.blogspot.com)

Sin embargo, no se encontraron productos fabricados con tecnologías de curvado aplicadas a maderas macizas locales ni referencias al proceso. Se desconoce el comportamiento frente al curvado de los géneros maderables de producción nacional y, por tanto, se hace difícil proyectar productos factibles de construirse con estas maderas con configuraciones estructurales curvadas.

En un escenario de abundancia de materia prima de calidad; evidente desarrollo profesional en diseño y capacidades tecnológicas y productivas instaladas, se espera que el análisis de la vocación al curvado y la caracterización mecánica de maderas de producción nacional proporcione a la industria del sector madera-mueble alternativas para su aprovechamiento diferenciado. Con esto se pretende aportar insumos que contribuyan a resignificar la calidad percibida de las maderas de pino y eucalipto mediante la incorporación de estructuras curvas en productos realizados con madera sólida.

La tecnología del curvado de la madera maciza se basa en exponer al material a un tratamiento de calor y humedad para someterla a esfuerzos de flexión de forma paulatina y constante, hasta deformarla más allá del dominio elástico sin sobrepasar el límite de rotura, manteniendo la compresión hasta que la madera alcanza el equilibrio higrotérmico.

En la presente investigación se estudiaron los radios mínimos de curvatura de los dos géneros maderables con proyección de mayor producción para los próximos 15 años, en probetas plastificadas de sección cuadrada de 22x22 mm.

Se diseñaron y construyeron la cámara de vaporizado, para el plastificado higrotérmico de las probetas; y el sistema flexor, para el curvado por tensión de las probetas.

Los resultados de la investigación fueron aplicados al diseño de un producto que explota las cualidades del proceso de curvado y las propiedades de la madera de pino.

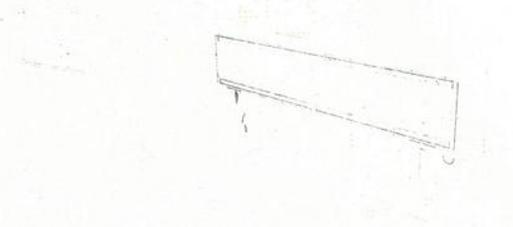


FIGURA 5. Cámara de vaporizado.

CAPÍTULO I  
PLANTEO DEL PROBLEMA

El Plan Sectorial Forestal-Madera (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2012, pág. 158) manifiesta que "los productos derivados de la madera para ser utilizados en la construcción involucran procesos de segunda y tercera transformación de la madera con mayor valor agregado y contenido tecnológico".

La tecnología del curvado de madera es un proceso capaz de implementarse de forma artesanal o industrial en la segunda etapa de industrialización de la madera, permitiendo el desarrollo de productos diferenciados de muy alto valor agregado, la especialización de la producción y la identificación del objeto con su lugar de origen.

Existe copiosa información sobre las características físico-mecánicas de especies maderables de producción nacional<sup>1</sup>; asimismo, existe profusa bibliografía sobre el comportamiento de numerosas especies en procesos de curvado de madera<sup>2</sup>.

Sin embargo, no se encontró información respecto la vocación para el curvado de estas maderas.

## 1.1 Contexto.

### 1.1.1 Fase primaria: PRODUCCIÓN.

La fase primaria involucra aproximadamente 950 mil hectáreas de bosques plantados (2010), a las que se agregan 750 mil hectáreas de bosque nativo, conformando una superficie forestal total de aproximadamente 1.700 mil hectáreas. Las industrias de base forestal se han expandido notoriamente durante la última década, impulsadas por el dinamismo de la fase primaria que ha permitido incrementar los niveles de extracción (oferta) de madera más de 3 veces en el período. La extracción total se elevó desde 3 millones de m<sup>3</sup> (2001) hasta prácticamente 10 millones (2010), correspondiendo más del 75 % de la misma a madera de bosques plantados. Gran parte de estos bosques plantados cuenta con certificación de manejo sustentable (Ministerio de Industria, Energía y Minería. 2012).

Para el período 2010-2030 se estima la oferta anual promedio de madera en rollo en 14,2 millones de m<sup>3</sup> (11,2 y 3,0 millones de m<sup>3</sup> de Eucalipto y pino respectivamente), de los cuales 10,0 millones de m<sup>3</sup> serán destinados a celulosa y 4,2 millones de m<sup>3</sup> a transformación mecánica (3,0 y 1,2 millones de m<sup>3</sup> de pino y eucalipto, respectivamente) (DIESTE. 2012).

Casi el 100% de los bosques plantados corresponden a eucalipto y pino. El 60% de la superficie plantada con fines industriales es destinada a celulosa. De las especies de eucalipto cultivadas, una parte de la producción del género *Grandis* tiene como destino la transformación mecánica para construcción y carpintería (también se encuentra *Eucalyptus saligna*, pero el porcentaje es despreciable). La producción de *Pinus taeda* se vuelca en su totalidad a la transformación mecánica

<sup>1</sup> Sobre características de maderas nacionales y recursos asociados, ver el Catálogo del Departamento Forestales del LATU. [En línea] [http://catalogo.latu.org.uy/index.php?lvl=etagere\\_see&id=14](http://catalogo.latu.org.uy/index.php?lvl=etagere_see&id=14). [Consulta: 5 Marzo 2014]

<sup>2</sup> Ver Capítulo II, 2.1.2: Investigaciones.

(el porcentaje de *Pinus elliottii* es también despreciable), ya que no existe industria de producción de celulosa en el país capaz de aprovecharlo (DIESTE. 2012).

Según Dieste (2012), "...en los próximos años habrá materia prima disponible para instalar capacidad industrial para procesar 2.3 millones de m<sup>3</sup> de pino y 500.000 m<sup>3</sup> de eucalipto. En un escenario que considerara el doble de la capacidad industrial estimada, aún sería necesario hacer inversiones para procesar 1.6 millones de m<sup>3</sup> de pino; mientras que la demanda de eucalipto superaría ligeramente la oferta. Por lo tanto, el déficit de capacidad industrial está claramente concentrado en el pino."

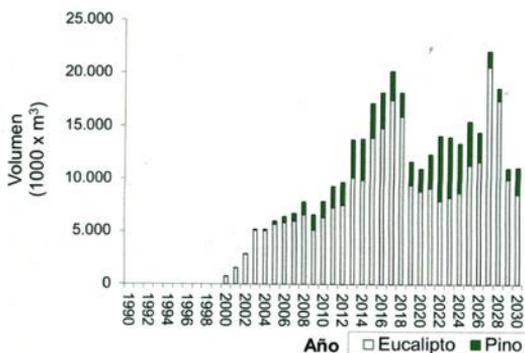


FIGURA 6. Proyección de oferta de madera con destino industrial para el período 1990-2030. Fuente: Dieste (2012)

### 1.1.2 Fase secundaria: TRANSFORMACIÓN.

Un posible campo de aplicación de piezas curvadas de madera sólida es en mobiliario, considerando el auge que está teniendo el sector.

La fabricación de muebles ocupa el 5to puesto (de 23) en cantidad de empresas<sup>3</sup> y el 8vo (de 23) en personal ocupado<sup>4</sup>, en la industria manufacturera nacional.

El 26 de marzo del presente año, se inauguró el Laboratorio de Muebles y Aberturas del LATU. Este laboratorio pretende "contribuir a la mejora en la calidad de los productos y procesos de producción nacional, instaurar los conceptos de calidad y diseño como elementos diferenciadores nacionales para aumentar la competitividad y orientar la articulación entre diseñadores e industriales en el rubro muebles". Durante la inauguración, el Ministro de Industria, Energía y Minería, Roberto Kreimerman, expuso: "Uruguay tiene un millón de hectáreas plantadas con árboles, muchas de las cuales están dirigidas a la pulpa de celulosa y a la industrialización de la madera como tal", por eso "ahora queremos desarrollar los muebles, que es otra parte de la cadena productiva de la madera"<sup>5</sup>.

<sup>3</sup> INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. "Uruguay en cifras 2013". 2013. p. 73.

<sup>4</sup> Ibid, p. 76.

<sup>5</sup> Presidencia de la República. Página principal. Nota. [En línea]

<http://www.presidencia.gub.uy/comunicacion/comunicacionnoticias/latu-laboratorio-muebles-aberturas>. [Consulta 15 marzo 2014].

Respecto al sector Diseño, también se nota un aumento significativo en la actividad de este rubro en lo que a mobiliario refiere: en abril del 2012, dieron inicio las actividades del Diploma de Especialización en Proyecto de Mobiliario (UDELAR-Farq). En diciembre del mismo año, la Comisión de Calidad e Innovación del Subgrupo de Trabajo N°7 "Industria" del MERCOSUR realizó la convocatoria para participar de la primera edición de la muestra de diseño, Salón "CELEBRAR, Diseño MERCOSUR"<sup>6</sup>. Durante 2013 Y 2014 se realizaron diversas muestras y exposiciones de diseño de mobiliario, tanto nacionales como internacionales; en 2013 se crea la Sub Mesa de Mobiliario -de la categoría producto- de la Cámara de Diseño de Uruguay.

En el transcurso del presente año han surgido sitios web nacionales de venta de muebles, dos de ellos dedicados específicamente a la venta de muebles de diseño: FUNCA<sup>7</sup> y MOD<sup>8</sup>.

Todo lo antepuesto indica que están dadas las condiciones para el desarrollo de productos de alto valor agregado derivados de la madera: hay materia prima, existe base industrial para la fabricación y masa crítica de profesionales con formación específica y especializada en el desarrollo de productos de madera.

## 1.2 Objetivos.

### 1.2.1 Objetivos generales.

- Contribuir al conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de las maderas de producción nacional.
- Aportar insumos que contribuyan a resignificar la calidad percibida de las maderas de pino y eucalipto.

### 1.2.2 Objetivos específicos.

- Desarrollar y construir el sistema de plastificado higrotérmico y curvado de probetas.
- Determinar el radio mínimo de curvatura de escuadrías vaporizadas de eucalipto y pino.
- Proyectar un producto que explote las cualidades del curvado y las propiedades físico-mecánicas de las maderas seleccionadas.

---

<sup>6</sup> Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industria Energía y minería. [En línea] <http://www.dni.gub.uy/-/celebrar-diseno-mercosur-2013>. [Consulta 17 marzo 2014].

<sup>7</sup> FUNCA. [En línea]. <http://www.funca.uy> [Consulta 2 abril 2014].

<sup>8</sup> MOD. [En línea] <http://www.mod.uy/> [Consulta 2 abril 2014].

### 1.3 Beneficios esperados.

El estudio de la aptitud al curvado de maderas nacionales será de subsidio al sector forestal-madera para favorecer la generación de productos diferenciados y de alto valor agregado.

Los resultados de la investigación aportarán insumos que contribuyan a mejorar la calidad percibida de los géneros maderables de mayor producción en el país.

Se profundizará el conocimiento de las características mecánicas físico-mecánicas de las maderas de pino y eucalipto.

Se dará continuidad a la investigación en la misma línea de trabajo, a partir del estudio de nuevas variables: espesores, anchos, torsionado; estudiando la incidencia del vaporizado en las propiedades físico-mecánicas; modificaciones de color y olor durante la vaporización; etc.

Se generarán vínculos académicos y profesionales entre el autor y actores relevantes del sector.

### 1.4 Limitantes.

Se propuso para el presente proyecto estar próximo a las condiciones objetivas y materiales de la industria del sector forestal-madera, a los efectos que los resultados de la investigación sean pertinentes y puedan ser de apropiación por los actores del sector. Por lo tanto:

- se trabajó con tecnologías y procesos capaces de ser replicados en una matriz industrial de dominio de pequeñas y medianas empresas nacionales;
- se utilizó materia prima factible de adquirirse habitualmente en plaza y
- en las condiciones normales en la que el material se comercializa.

No se trabajó en un ambiente controlado de temperatura de humedad. Por lo tanto, los resultados de la investigación están restringidos a las condiciones espaciales y temporales en los que se desarrolla el trabajo, con especial consideración de las características climáticas. Los ensayos de material se realizaron en el departamento de Montevideo, durante los meses de Diciembre de 2014 a Febrero de 2015.

Es una condicionante para las hipótesis y metodología de trabajo planteadas el no tener control sobre la temperatura de la cámara, particularmente, no poder mantenerla estable por tiempo determinado.

CAPÍTULO II  
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## 2.1 Antecedentes.

### 2.1.1 Reseña histórica.

Las primeras aplicaciones de curvado de madera están vinculados al surgimiento y evolución de la arquería. El arco de caza es el primer objeto construido por el hombre que aprovecha la condición elástica de la madera en solicitaciones de flexión. Su historia se remonta al paleolítico superior (35.000 a.C. a 10.000 a.C.) y es considerado uno de los descubrimientos más significativos en la historia del hombre. Los primeros arcos estaban hechos de ramas de árbol doblada; la evolución comenzó a darse probando distintos tipos de madera y encuentra su primer salto tecnológico en la civilización egipcia (2.900 a.C.), quienes desarrollaron un arco compuesto con diferentes tiras de madera (HIDALGO. 2013).

El curvado de madera por calor tiene origen en la fabricación de barricas. Los primeros fabricantes de estos contenedores de madera fueron los Celtas. Inicialmente, se construyeron por vaciado de troncos, hasta que descubrieron la aptitud de la madera de ser curvada cuando se calienta (VIVAS. 2005). Hoy en día, se sigue aplicando la técnica de curvado de madera por calentamiento a fuego directo en la fabricación artesanal de toneles<sup>9</sup>; a nivel industrial, puede verse la aplicación de procesos de curvado por vapor<sup>10</sup>.

En mobiliario, la tecnología del curvado de la madera tiene unos doscientos años de historia. A principios del siglo XIX surgen métodos sofisticados para modelar la madera: en 1805, Jean Joseph Chapuis experimenta el curvado con maderas laminadas; en 1808 Samuel Gragg patenta en Boston el prototipo "Elastic chair" en madera maciza curvada. Pero es Michael Thonet quien a fines del siglo XIX marca un hito en la historia de la producción y el curvado de madera, patentando una técnica que permitió la industrialización y la producción en serie de sillas. En Italia, en 1920 Carlo Ratti experimenta el curvado por laminado. A principios de los años treinta, Alvar Aalto y Marcel Breuer aplican esta técnica en el diseño de sillas y sillones de madera con formas curvas. El laminado también es aplicado en arquitectura; los primeros diseños con este sistema datan de 1890 y la primera patente para la fabricación de vigas rectas fue en Suiza en 1901, registrada por Karl Friedrich Otto Hetzer. (ARAYA. 2005)<sup>11</sup>.

Desde entonces, la evolución tecnológica ha permitido el desarrollo industrial de piezas curvas cada vez más complejas. Hoy en día se comercializan en Europa varias marcas de maderas desarrolladas (mediante tratamientos termoquímicos y mecánicos) específicamente para curvado<sup>12</sup>.

---

<sup>9</sup> Tonelería José Luis Rodríguez S.L. Video promocional. [En línea]. <https://www.youtube.com/watch?v=iHpZwzv14Y0>. [Consulta: 19 julio 2014].

<sup>10</sup> Cómo se elaboran barriles de madera. [En línea]. <https://www.youtube.com/watch?v=SopJsmWcr68>. [Consulta: 19 julio 2014].

<sup>11</sup> Es sabido que el desarrollo de la tecnología del curvado de madera está asociado también al origen y desarrollo de la carpintería de ribera. Sin embargo, no se encontraron referencias al respecto en un relevamiento primario de

<sup>12</sup> Bendywood (R). [En línea]. <http://www.bendywood.info/>. [Consulta: 19 setiembre 2014].

### 2.1.2 Antecedentes tecnológicos.

Las investigaciones sobre curvado de madera como subsidio a la industria forestal son de larga data: Stevens y Turner (1948); Kollmann y Cote (1968); Peck (1968), entre otros (LEMOINE y KOCH. 1971).

Araya (2005), Chile, determinó las características de curvado de madera sólida de Lengua y Tepa por plastificado higrotérmico. Lo mismo Gatto (2006), en Brasil, para las especies *Luehea divaricata*, *Carya illinoensis* y *Platanus x acerifolia*; Olguin y Sotomayor (2013), en Méjico, para el *Quercus scotyphylla*.

De Peres y col. (2013), Brasil, proponen las características de las maderas sólidas mejor aptas para el curvado. Estos investigadores estudiaron también los defectos de curvado de madera de *Eucalyptus grandis*, de la región de Paraná, Brasil.

Espinoza (2012), Ecuador, realiza para su trabajo de graduación para la obtención del título de "Diseñador de objetos" un "Manual para curvado de madera y MDF".

En Chile (2012), un grupo de diseñadores, en el Laboratorio de Prototipos del Departamento de Arquitectura de la Universidad de Los Lagos, desarrolla un proyecto con el objetivo de construir estructuras para mobiliario a partir de una única pieza de madera sólida, utilizando la tecnología del curvado<sup>13</sup>.

A nivel nacional, Nicola y Menini (2011) desarrollan el proyecto "Usos no convencionales de maderas nacionales para la fabricación de muebles de diseño", investigación que estudia las posibilidades de curvado en seco del finger joint de *Eucalyptus grandis*.

Chaves (2014), desarrolla la monografía "Revisión bibliográfica sobre curvado de madera", relevando distintos procesos de curvado de madera.

### 2.1.3 Experiencias previas.

Las primeras experiencias personales en curvado de madera maciza fueron realizadas en el 2003, en el curso *Taller de Maderas*, a cargo de Marcelo Patiño, en lo que entonces era el Centro de Diseño Industrial (CDI). Allí se dió la primera aproximación experimental a la tecnología del curvado.

Previo al comienzo del presente proyecto, se realizaron ensayos de curvado en el taller de Andrés Parravicini, quien también se encontraba interesado en investigar el proceso, a los efectos de conocer la técnica y el comportamiento de la madera. Se construyó una cámara de vapor y se utilizó como molde una pieza semi cilíndrica ya existente que ofrecía un radio de 20cm.

Se hicieron pruebas con pino, eucalipto, Álamo y Roble, sin faja de apoyo. Todas las piezas colapsaron a tracción; lo que se consideró normal, ya que fueron flexadas sin faja.

<sup>13</sup> Programa Regional de Investigación Científica y Tecnológica. [En línea]. <http://www.conicyt.cl/regional/noticias/>. [Consulta: 23 noviembre 2014].

## 2.2. Marco teórico.

### 2.2.1 Tecnología del curvado de la madera.

La tecnología de plastificado de la madera, como práctica industrial, es conocida como curvado. En comparación con otras tecnologías de mecanizado, el curvado de la madera permite un ahorro considerable en material y energía, minimiza el desperdicio de material, el proceso es rápido y puede realizarse con herramientas simples. Además, la resistencia mecánica y elástica es mayor comparativamente en piezas curvadas que en piezas semejantes obtenidas por otros tipos de mecanizados (OLGUÍN, SOTOMAYOR; 2013 y LEMOINE, KOCH; 1971).

Las mayores desventajas son la probabilidad de perder piezas por rotura durante el proceso y eventual pérdida de curvatura por exposición a humedad ambiente elevada (LEMOINE, KOCH; 1971).

La reología es una disciplina científica que se dedica al estudio de la deformación y flujo de la materia. Propone que, generalizando, para unas condiciones dadas de presión y temperatura:

- el material responde a la aplicación de un esfuerzo primero con una deformación elástica reversible, que es directamente proporcional al esfuerzo;
- luego con una deformación plástica irreversible que aumenta más rápidamente que el esfuerzo y,
- por último, con una deformación rígida también irreversible (colapso), que a diferencia de las anteriores, rompe la continuidad original del material.

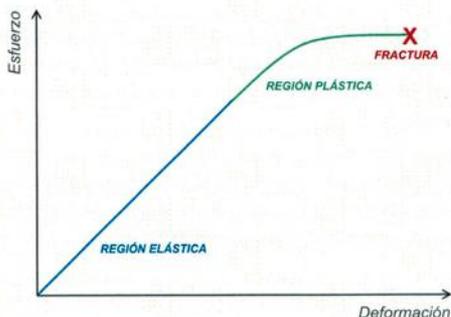


FIGURA 7. Relación esfuerzo - deformación del material.  
Fuente: [www.upload.wikimedia.org](http://www.upload.wikimedia.org)

Este modelo se verifica para comportamientos lineales. La madera es un sólido deformable de carácter anisotrópico, por lo que, en la práctica, es imposible de aplicar un modelo reológico; aún así, ayuda a entender su comportamiento.

Ante solicitudes de flexión, todo material responderá en su cara cóncava con esfuerzos de compresión y en su cara convexa con esfuerzos de tracción. Estos esfuerzos serán mayores hacia los extremos (caras) de las piezas y disminuirán hacia el interior, hasta llegar a una zona en la que no se generan tensiones y, por lo tanto, no se producen deformaciones, denominada *línea neutra*. Idealmente la línea neutra se ubica en el centro de la pieza, libre de tensiones. Al curvar una pieza de madera sin tratamiento previo, la línea neutra se desplaza levemente hacia la zona de tracción, ya que la madera es mucho más resistente a esfuerzos de compresión. Ante un mismo esfuerzo de tensión, la madera colapsará primero en la zona de tracción.

Cuando la madera es plastificada, se hace más flexible, mejora su capacidad de estiramiento (tracción) y aumenta significativamente su capacidad de contracción (compresión), independientemente del tratamiento que se le aplique. En esta situación, la línea neutra se desplaza aún más hacia la zona de compresión (GATTO, 2006).

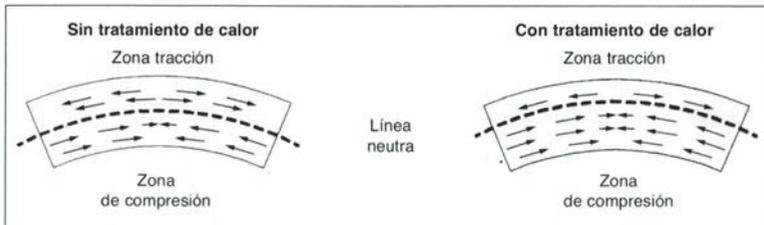


FIGURA 8. Desplazamiento de la línea neutra.  
Fuente: GATTO (2006).

En el siguiente gráfico se muestran los valores de tensión-deformación a esfuerzos de tracción y compresión de la madera de Fresno a temperatura ambiente y a 100°C. Puede verse como a esfuerzos de tracción los cambios de comportamiento son relativamente pequeños, pero, a compresión, los cambios son significativos y la deformación aumenta rápidamente ante el esfuerzo (VIGNOTE, 2006).

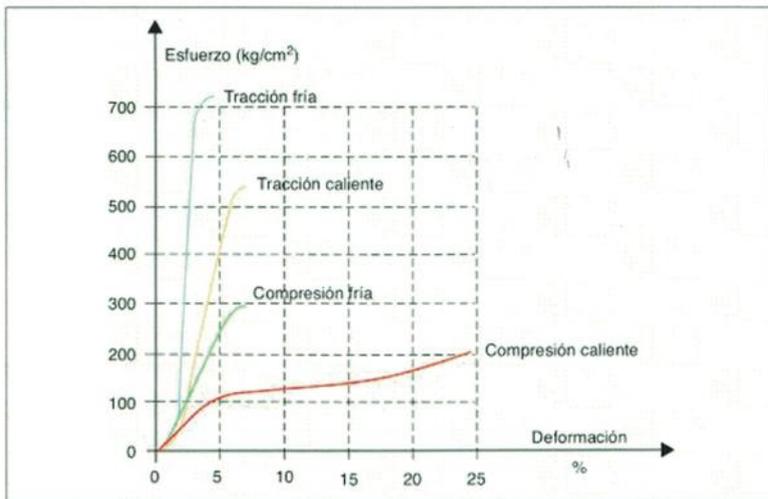


FIGURA 9. Variación de los esfuerzos de tracción y compresión por temperatura.  
Fuente: OLGUIN Y SOTOMAYOR (2013).

La temperatura mejora la cualidad plástica de la madera a través de un proceso reversible de transformación química de sus moléculas. Olguín y Sotomayor (2013), citando a Oltean (2007), plantean que la resistencia mecánica de la madera no es afectada de manera permanente si ésta es expuesta por periodos cortos y a temperaturas menores a 100 °C. Sin embargo, la resistencia puede disminuir de forma permanente si la madera se expone a una temperatura mayor de 65 °C, durante periodos de tiempo prolongado.

La temperatura también condiciona la velocidad del movimiento del agua al interior de la madera. El incremento de temperatura aumenta el coeficiente de circulación, a 80°C la velocidad de movimiento del agua es aproximadamente 5 veces mayor que a 20°C.

Apoyada en estos principios, la tecnología del curvado de la madera se basa en suministrar a la madera un tratamiento de calor y/o humedad y somerla a esfuerzos de flexión de forma paulatina y constante hasta deformarla más allá del dominio elástico, sin sobrepasar el límite de rotura, manteniendo la compresión hasta que la madera se seca y enfría.

El proceso de suministrar a la madera temperatura y humedad por vapor de agua para curvarla se denomina *plastificado higrotérmico*.

### **2.2.2 Características generales de los procesos de curvado.**

El curvado de madera consiste en aplicar un esfuerzo de tensión al material a los efectos que este adquiera una forma determinada. Generalmente, esta forma viene dada por un molde, que recibe el material a curvar y le transfiere la forma.

El esfuerzo de compresión es mantenido hasta que la pieza seca o fragua el adhesivo. Una vez retirada del molde, la pieza tiende a deformarse por efecto de la memoria elástica residual del material. Esta deformación es variable y dependerá de las condiciones del sistema, el tipo de material empleado y la curvatura. El tiempo de prensado también es variable, dependiendo del tipo de proceso y, fundamentalmente, si se aplica calor al sistema durante el prensado.

Todos los procesos de curvado requieren la mecanización posterior de la pieza; este podrá ser más o menos complejo según el tipo de proceso realizado.

### **2.2.3 Tipos de procesos de curvado.**

La madera aserrada puede curvarse de forma natural con radios de curvatura mínimos que varían entre 200 y 300 veces su espesor, dependiendo de la especie; por lo tanto, una tabla de 25mm de espesor podría curvarse con un radio de hasta 5m. Radios menores corren riesgo de rotura, salvo que se apliquen tecnologías específicas de curvado.

En el siguiente cuadro se presentan los diferentes procesos de curvado aplicables a la madera. En él, proponemos una caracterización primaria de cada proceso a partir de 3 factores significativos: humedad, temperatura de trabajo y material (ver en anexos detalles de cada proceso).

Humedad			Temperatura			PROCESO	Madera		
H>30%	30%>H>12%	12%>H	Baja	Ambiente	Alta		Sólida	Ingeniería	Derivados
o				o		Madera verde	o		
	o	o		o		Curvado laminar	o	o	o
	o	o		o		Entalladura	o	o	o
	o			o	o	Inmersión	o		
	o		o		o	Tratamiento químico	o		
	o			o		Pre compresión	o		
	o	o			o	Microondas	o	o	o
	o			o		Calor directo	o	o	o
	o	o			o	Calor con placa	o	o	o
	o			o		Vaporizado	Alta presión	o	
	o			o			Baja presión	o	

FIGURA 10. Procesos de curvado.

**HUMEDAD DE TRABAJO:** contenido de humedad del material durante el proceso de curvado.

El contenido de humedad de la madera es una de las características fundamentales del material; de éste dependen las propiedades físico-mecánicas y estabilidad dimensional, entre otros.

La madera absorbe o libera humedad hasta alcanzar el equilibrio higroscópico con el ambiente. Todos los valores de resistencia mecánica aumentan a medida que disminuye la humedad, hasta que alcanza el punto de equilibrio higroscópico. La dureza, tracción, corte, compresión, son mayores en maderas secas que húmedas, a excepción de la elasticidad (CALDERÓN; s.f.).

Otro factor relevante respecto al contenido de humedad de la madera es que posibilita la acción de agentes xilófagos, particularmente hongos, los que requieren un mínimo del 20% para poder desarrollarse en el tejido leñoso (bido). Por lo tanto, procesos de curvado que lleven el nivel de contenido de humedad de la madera por encima del 20% ponen en riesgo material.

**TEMPERATURA DE TRABAJO:** temperatura del material durante el proceso de curvado.

**MATERIAL:** clasificación de la madera según producto final obtenido en relación a los procesos de transformación aplicados.

- **MADERA SÓLIDA** o **MADERA MACIZA:** madera tal como se encuentra en la naturaleza, aserrada y seca: alfajías, tablas, vigas, láminas, etc.
- **MADERA DE INGENIERÍA:** productos fabricados mediante la combinación de madera sólida y adhesivos para mejorar las propiedades mecánicas del producto final: tableros o vigas de madera maciza (Finger joint), multilaminados, etc.
- **DERIVADOS DE MADERA:** productos obtenidos a partir de la mezcla de restos o residuos producidos por la transformación de la madera y adhesivos aglutinantes: tableros de partículas (MDF, aglomerado, Duraboard...) etc.

Los productos de madera pueden ser curvados por determinados procesos y no por otros, dependiendo de las características del producto.

#### 2.2.4 Fleje metálico o banda de apoyo.

Cuanto menor es el radio de curvatura en relación al espesor de la pieza, mayores serán las tensiones de tracción y compresión. Cuando estas tensiones sobrepasan las deformaciones admisibles, la pieza colapsa, independientemente del proceso de plastificación.

Thonet desarrolló un sistema capaz de transformar los esfuerzos de tracción que actúan en la escuadría en esfuerzos de compresión, para los que la madera ofrece mucha mejor resistencia. Este sistema consiste en colocar un fleje metálico sobre la cara cóncava de la pieza a curvar que a su vez la aprieta desde las testas, impidiendo la dilatación de las fibras.

No se encontró información sobre características tecnológicas de esta herramienta. Del relevamiento de fuentes de información secundarias, se supuso, para la realización de la banda de apoyo, que:

- el material del fleje es acero de alto carbono; idealmente acero inoxidable, para evitar corrosión por contacto con la humedad de la madera;
- el ancho del fleje es igual o mayor al ancho de la muestra;
- la anchura y altura de los topes del fleje son iguales o mayores a la sección de la muestra; un análisis detallado del comportamiento de las fuerzas que actúan durante el flexado podría determinar la altura óptima del tope en relación al espesor de la muestra.



FIGURA 11 Fleje metálico. Izq. fotografía del autor; der. [www.philadelphiafurnitureworkshop.com/blog](http://www.philadelphiafurnitureworkshop.com/blog)

La siguiente tabla compara radios mínimos (R mín) logrados para diversas especies vaporizadas (espesor: 2.54 cm) con y sin fleje metálico:

Tabla 1. Comparación de radios de curvatura por especie.  
Fuente: GATTO (2006).

Especie	R mín (cm) con fleje	R mín (cm) sin fleje
<i>Picea excelsa</i>	76.2	-
<i>Pinus caribaea</i>	36.6	71.1
<i>Eucalyptus pilularis</i>	58.4	86.4
<i>Eucalyptus obliqua</i>	40.6	61.0
<i>Quercus robur</i>	5.1	33.0
<i>Podocarpus guatemalensis</i>	86.4	-
<i>Fagus sylvatica</i>	10.2	35.6

## 2.2.5 Características de la materia prima.

### 2.2.5.1 Defectos.

Los defectos más comunes en la madera son:

- inclinaciones de grano,
- nudos,
- signos de ataque de organismos xilófagos,
- grietas y rajaduras.

Es necesario, para procesos de curvado de madera maciza, trabajar con madera libre de defectos. Las inclinaciones de grano, nudos y grietas provocan que las tensiones no se distribuyan de forma homogénea en la pieza durante la flexión.

La madera con grano inclinado tiende a responder de forma inestable e inesperada; tienen mejor comportamiento maderas de grano recto y paralelo al eje longitudinal.

Se denomina "grano" a la dirección que adquieren los diferentes elementos anatómicos con respecto al eje del árbol. Se definen distintos tipos de grano: recto, inclinado, helicoidal, entrecruzado, etc. Las maderas de grano recto presentan mayor resistencia mecánica respecto las maderas con grano desviado y resultan más fáciles de transformar mecánicamente (aserrado, cepillado, lijado, etc.) (DOLDÁN, 2006).

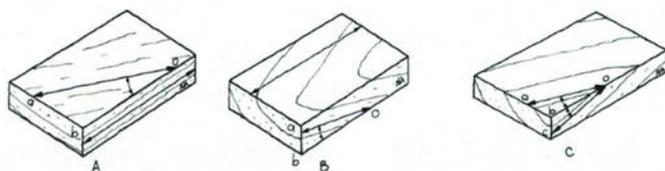


FIGURA 12. Desviación del grano (A) y (B) en un plano, (C) en dos planos.  
Fuente: CHAN (2002).

No se encontró información que permita generalizar las características del grano de las especies de producción nacional. Las investigaciones de Doldán indican la existencia de grano inclinado y entrecruzado en *Eucalyptus grandis*. El grano espiralado en *Pinus taeda* presenta un ángulo muy bajo respecto otras especies de pino.

### 2.2.5.2 Estructura anatómica.

Las maderas de latifoliadas tienen mejor aptitud para el curvado que las de coníferas (OLGUÍN y SOTOMAYOR; 2013. DE PERES y col; 2013).

Murakami y col. (2002) estudiaron el curvado higrotérmico de varias especies, constatando la importancia de la estructura de la madera en la calidad del curvado y propusieron una clasificación jerárquica de maderas con vocación para ser plastificadas higrotérmicamente:

1. angiospermas (latifoliadas) de clima templado,
2. angiospermas de clima tropical,
3. especies gimnospermas (coníferas).

Según Araya (2005), si los anillos de crecimiento son dispuestos de forma paralela a la cara del molde, los resultados serán sensiblemente mejores que con los anillos perpendiculares. De forma ideal, las piezas a curvar deberán obtenerse de escuadrías de corte radial del tronco, las que son difíciles de conseguir en plaza e implica un esfuerzo de selección de material en barraca.

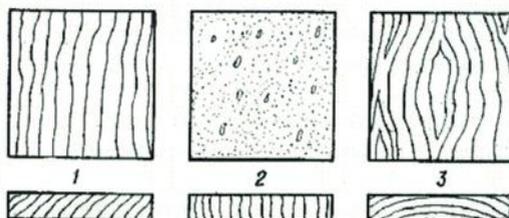


FIGURA 13. Corte de la madera.  
1. Corte semi radial 2. Corte radial 3. Corte tangencial.  
Fuente: [www.stolear.com/es](http://www.stolear.com/es).

### 2.2.5.3 Contenido de humedad.

Según Peck (1957), para curvados leves es suficiente que la madera tenga un contenido de humedad en el entorno del 15%; para curvados más acentuados, este valor deberá estar en un rango de 20 a 35%. Para Vorreiter (1958), maderas con humedad de entre 15 y 20% pueden ser vaporizadas o sumergidas en agua caliente (el tiempo de inmersión, dependiendo de la especie, varía de 12 a 15 cm por cm de espesor) (DE PERES. 2013).

Para De Peres (2013), el rango óptimo de contenido de humedad es de 20 a 30%, no siendo necesario agregar más humedad si la temperatura del sistema se mantiene próxima a los 100°C.

La humedad de equilibrio de tablas de pino y eucalipto (secadas naturalmente) en verano, en Montevideo rondan los 14.6 y 13.2% respectivamente (CASTRO).

Las probetas vaporizadas de pino y eucalipto deberán estar en el entorno de 20% de contenido de humedad.

## 2.2.6 Defectos en el proceso de curvado.

	<p>Defecto: <b>APLASTAMIENTO</b>            Zona: <b>Cóncava</b>            Causa probable: <b>Curvatura muy pequeña</b></p>
	<p>Defecto: <b>PLIEGUE TRANSVERSAL</b>            Zona: <b>Cóncava / Cantos</b>            Causa probable: <b>- Temperaturas de vaporizado muy elevada            - Exceso de tiempo de vaporización            - Curvatura muy pequeña</b></p>
	<p>Defecto: <b>CIZALLAMIENTO LONGITUDINAL</b>            Zona: <b>Centro</b>            Causa probable: <b>- Curvatura muy pequeña            - Los apoyos del fleje no están firmes</b></p>
	<p>Defecto: <b>HENDIDURA TRANSVERSAL</b>            Zona: <b>Convexa, hasta 1/3 del material</b>            Causa probable: <b>Los apoyos del fleje no están firmes</b></p>
	<p>Defecto: <b>ASTILLADO</b>            Zona: <b>Convexa</b>            Causa probable: <b>- Grano inclinado            - Velocidad de trabajo excesiva</b></p>
	<p>Defecto: <b>RUPTURA PERPENDICULAR</b>            Zona: <b>Convexa</b>            Causa probable: <b>- Tiempo de vaporizado escaso            - Velocidad de trabajo excesiva</b></p>
	<p>Defecto: <b>HENDIDURAS DE SECADO</b>            Zona: <b>Convexa</b>            Causa probable: <b>-Secado inadecuado</b></p>

FIGURA 14. Principales defectos posibles de suceder durante el proceso de curvado.  
 Fuente: DE PERES (2013). Modificado.

## 2.3. Hipótesis.

1- Por ensayos preliminares, podemos inferir que los radios mínimos de curvatura para las probetas de pino y eucalipto están en el umbral de los 20-30 cm.

2- Podemos suponer, por conversaciones mantenidas con referentes en el tema, que dada la composición de la madera de eucalipto, las probetas de esta especie tendrán un radio mínimo de curvatura mayor que las probetas de pino.

## 2.4. Variables.

En la presente investigación, las variables analizadas son género y radio.

**GÉNERO:** se ensayaron probetas de madera de pino y eucalipto.

Las especies comercializadas en barracas al momento de la consecución del material fueron *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis*.

**RADIO:** el molde consideró radios incrementales en módulos de:

- 5.0cm, de 10 a 25cm de radio;
- 2.5cm, de 25.5 a 32.5cm de radio.

CAPÍTULO III  
METODOLOGÍA

### 3.1 Desarrollo metodológico.

El enfoque metodológico de la presente investigación es cuantitativo, basado en la recolección de datos por medición y evaluación visual y posterior análisis de los datos obtenidos.

La investigación se desarrollará en los talleres de la EUCD, Farq, UDELAR.

Los ensayos se realizarán con madera de pino y eucalipto.

A los efectos de lograr mayor variabilidad en la muestra, la materia prima para los ensayos se obtuvo de proveedores locales diversos.

Es una práctica habitual en la industria que el comprador pueda seleccionar el material en la barraca, por lo que se buscó tablas que contengan la menor cantidad de defectos posibles a la vista.

Las probetas fueron de espesor, ancho y largo constantes, considerando que:

- el espesor del material incide en el radio de curvatura. A menor espesor, mayor probabilidad de obtener menores radios de curvatura (es el principio del curvado laminar);
- no se encontró información sobre la incidencia del ancho de la pieza en el radio de curvatura;
- el largo de la pieza no afecta el radio de curvatura, en cuanto sea funcional a la operación de curvado.

Dimensiones de las probetas: 1150 x 22 x 22 mm +/- 1mm.

Se efectuaron 5 repeticiones<sup>14</sup> por género y por radio de curvatura. Por lo tanto, se necesitaron (5x2x4) 40 probetas, 20 de pino y 20 de eucalipto.

Considerando un desperdicio por defecto del material de un 30% y otro 20% por imprevistos y probetas testigo<sup>15</sup>, se utilizaron 3 tablas de pino y 3 de eucalipto de 240 cm x 25 cm x 1".

#### 3.1.1 Tiempo de vaporizado.

El tiempo de vaporizado es relativo al espesor de las probetas. La bibliografía relevada recomienda, de 1 a 2 minutos por milímetro de espesor. Las muestras ensayadas fueron vaporizadas por 2 min/mm.

#### 3.1.2 Incidencia de la posición de la probeta respecto al molde.

Se tuvo en consideración (según lo expuesto en 2.2.5.2 *Estructura anatómica*), a la hora de la realización de los ensayos, la disposición de las probetas respecto al molde, según los anillos de crecimiento. Se buscó que la disposición de los anillos de crecimiento de las probetas, en lo posible, fuese paralela al molde. Los ensayos que se realizaron con disposición perpendicular fueron por errores de operación.

La determinación de la posición se realizó por inspección visual de las testas de las muestras.

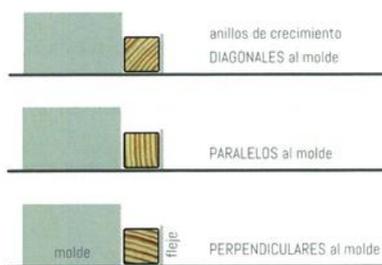


FIGURA 15. Posición de la probeta respecto al molde.

<sup>14</sup> Cantidad sugerida por investigador referente.

<sup>15</sup> De cada tabla se conservará sin vaporizar una probeta como testigo

### 3.1.3 Fuerza aplicada.

Se buscó medir la fuerza ejercida por el sistema de flexado para el curvado de las probetas. Para ello, se modificó el sistema de flexado, anulando el malacate y aplicando tensión por carga; se utilizó un conjunto de pesas de 20kg y 10kg.

### 3.1.4 Calificación de probetas curvadas.

Los defectos en las probetas se evaluaron por inspección visual y fueron clasificadas siguiendo la metodología empleada por Lemoine y Koch (1971). Los autores proponen una escala jerárquica de caracterización según el grado de colapsos producidos.

Para este trabajo la escala de calificación de probetas curvadas será<sup>16</sup>:

DEFICIENTE	0	Roturas o colapsos significativos en tracción y/o compresión.
REGULAR	1	Colapsos superficiales en tracción y leves en compresión.
BUENA	2	Colapso mínimo en compresión.
EXCELENTE	3	Libre de colapso.

### 3.1.5 Variación del radio por tensión residual (springback<sup>17</sup>).

Se buscó determinar la variación del radio por tensión residual, en probetas con calificación 2 y 3. Una vez que la muestra alcanzó el equilibrio higrotérmico es liberada del molde; a partir de allí se le realizaron mediciones periódicas al diámetro de la pieza conformada.

## 3.2 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.

### 3.2.1 Instrumentos.

Fueron utilizados:

- un termómetro marca Fluke con termocupla para el registro de las temperaturas de la cámara de vapor, las probetas y el ambiente;
- un xilohigrómetro marca Étxech con termocupla para el registro del contenido de humedad de las probetas;
- un termo-higrómetro de ambiente marca Kendo para el registro de la temperatura y la humedad ambiente.

<sup>16</sup> Ver en anexo cuadro con escala de calificación de probetas del proyecto.

<sup>17</sup> El **springback** es el cambio geométrico de una pieza al final del proceso de deformación cuando ha sido liberada de la herramienta de conformado. Fuente: Autoform. [En línea] <http://www.autoform.com/es/glosario/springback/> [Consulta: 29 noviembre 2014].

## 3.2.2 Plan de recolección y procesamiento de datos.

### 3.2.2.1 Codificación de probetas.

Cada tabla obtenida fue registrada con el siguiente código:

- NÚMERO DE TABLA: TBL1, TBL2, ... TBL10.
- GÉNERO: P (pino); E (eucalipto).
- ESPECIE: *taeda*, *elliottii*, *grandis*, etc.
- FUENTE: nombre de la barraca.
- SECADO: Natural / Artificial

Ejemplo de código en tabla: TBL1/P. Taeda/El puntal/Natural

Una vez cortada la tabla y calibradas las alfajas, se marcó en cada probeta el número de tabla. Cada probeta, previa vaporización, fue marcada con el siguiente código:

- NÚMERO DE TABLA: TBL1, TBL2, ... TBL10..
- RADIO: 15, 20, 25, 30 (cm)
- ORDEN cronológico de ingreso a cámara, por día.

Ejemplo de código en probeta: TBL1/20/1

### 3.2.2.3 Fichas de registro

Se utilizaron fichas de registro para la recolección de datos de tablas y de cada ensayo (ver diseño en anexos). Las fichas de registro para ensayos presentan la siguiente información:

- Fecha.
- Hora.
- Temperatura ambiente.
- Humedad ambiente.
- Código de probeta.
- Contenido de humedad de la probeta:
  - $h_0$ : previo ingreso a cámara.
  - $h_1$ : a la salida de la cámara.<sup>18</sup>
  - $h_q$ : equilibrio higrotérmico.<sup>19</sup>
- Tiempos:
  - $t_0$ : hora de ingreso a cámara.
  - $t_{tq}$ : hora de equilibrio térmico ( $T_q = T$  ambiente).
  - $T_{hq}$ : hora de equilibrio higroscópico.
- Fuerza F (N) necesaria para curvar la probeta.
- Cuerda final.<sup>20</sup>
- Tipo de defecto, en caso de presentar.
- Calificación.

<sup>18</sup> La medición se realizará una vez curvada la pieza, rostriada y fuera del molde, dando tiempo a que la temperatura de la probeta descienda los 40°C, rango de trabajo del xilohigrómetro.

<sup>19</sup>  $h_1$  y  $h_q$ , en condiciones de humedad y temperatura ambiente semejantes al inicio del ensayo. En caso que las condiciones ambientales hayan variado significativamente, se medirá la humedad de una muestra testigo del mismo material no vaporizada.

<sup>20</sup> La probeta será arriestrada una vez quitada del molde y hasta que alcance el equilibrio higroscópico. Se medirá la cuerda de la probeta una vez quitada la riostra, a los efectos de conocer la incidencia de la memoria elástica residual.

### 3.3 Cámara de vaporización.

El diseño de la cámara de vaporizado se basó en el modelo propuesto por Olguín y Sotomayor (2013):

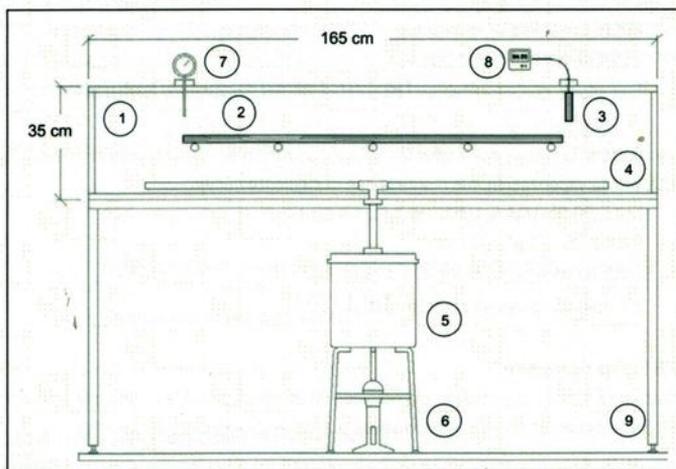


FIGURA 16. Esquema de cámara de vaporizado. 1. Cámara 2. Listón 3. Probeta testigo para temperatura interna de la madera 4. Difusor de vapor 5. Generador de vapor 6. Fuente de calor 7. Termómetro de temperatura de la cámara. 8 Sensor de temperatura de la probeta 9 Estructura de soporte de la cámara.  
Fuente: OLGUÍN Y SOTOMAYOR (2013).

El material estructural seleccionado fue tablero contrachapado, con recubrimiento a base de polímeros, desarrollado especialmente para el armado de encofrados de hormigón. Las láminas que la conforman son encoladas entre sí con resina fenólica con certificación ISO 9001, 100% a prueba de agua<sup>21</sup>.

Se aisló el contrachapado con manta de polietileno expandido de 10 mm de espesor, material que, es usado, entre otros, para aislamiento de calderas. Sin embargo, no fue suficiente para evitar la pérdida de calor, por lo que se aplicó un recubrimiento de poliestireno expandido (Espuma Plast) de 2cm de espesor.

<sup>21</sup> Fuente: Barraca Samic. [En línea] <http://www.samic.com.uy/fenolicos-plasticados-formaplan/> [Consulta: 25 noviembre 2014].

La fuente de calor es una plancha de vapor vertical (marca Tobi) de 1400 watts, con una entrega de caudal de vapor de vapor estimada<sup>22</sup> de 30gr/min.

Se le modificó a la plancha el depósito de agua, debido a que el original no contenía el volumen de agua necesario para la operación.

En estas condiciones, la cámara alcanza una temperatura promedio de trabajo de 99 °C en 72 minutos. Se vaporizaron probetas testigo durante 40 minutos, alcanzando una temperatura de 96.5 °C. (ver en anexos: Análisis de datos del sistema).

En anexos se encuentran las especificaciones técnicas de la construcción de la cámara de vapor.



FIGURA 17. Cámara de vaporizado construida para la investigación.  
Fotografías del autor.

---

<sup>22</sup> Estimación realizada por comparación con otros productos similares que presentaban dicha información en las especificaciones técnicas.

### 3.4 Sistema de flexado.

El mecanismo para la flexión de las probetas se basó en el propuesto por Cottey (1975).

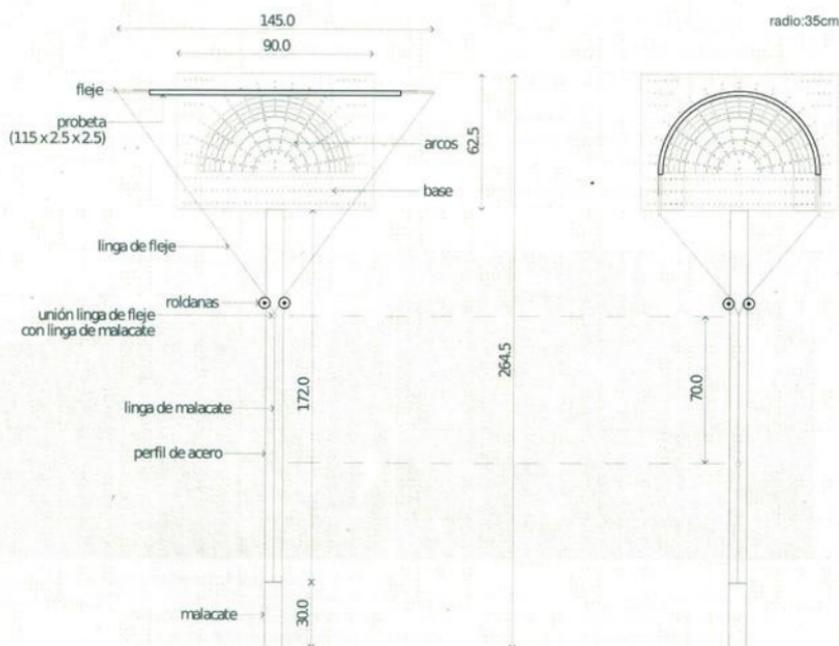


FIGURA 18. Esquema del sistema de flexado.

El sistema de arcos variables para el estudio de los radios de curvatura fue diseñado para admitir todos los radios de curvatura del molde sin necesidad de añadir accesorios o intercambiar partes. El tensor y los topes del fleje fueron construidos en acero en el taller Patiño; para el fleje se utilizó una banda usada de sierra sin-fin de 5cm de ancho.

Los arcos y la base fueron construidos con contrachapado plastificado por mecanizado CNC, en el taller del LabFab, en Farq, a los efectos de lograr la mayor precisión posible en el encastre de las piezas.

Ver en anexos especificaciones técnicas.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS

Se realizaron un total de 76 ensayos, de los cuales se descartaron 11, dando un total de 65 ensayos válidos<sup>23</sup>.

Según la escala de calificación propuesta en el capítulo 3 (3.1.4 Calificación de probetas curvadas), del total de ensayos válidos se obtuvieron 15 resultados buenos y excelentes (23.1%) y 50 resultados deficientes y regulares (76.9%).

El radio mínimo de curvatura para cualquier especie se considera válido cuando no más del 5% de las pruebas presentan fallas (GATTO (2006), de VORREITER (1958)). Estarían en estas condiciones únicamente las muestras de pino ensayadas con el radio de 54cm, con un contenido de humedad superior al 20%, donde los resultados fueron obtenidos de forma sistemática.

#### 4.1 Síntesis.

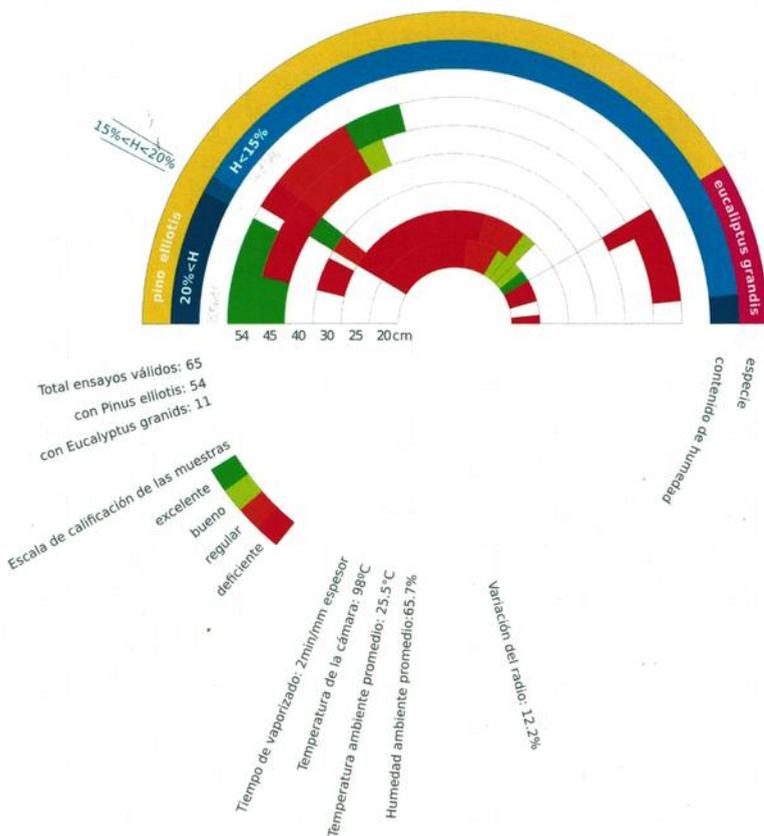


FIGURA 19. Síntesis de los resultados obtenidos.

<sup>23</sup> Se considera un ensayo válido cuando la muestra califica en las categorías 2 o 3 de la escala de calificación de probetas (sección 3.1.4).

## 4.2 Total de ensayos válidos.

Tabla 2. Total de ensayos válidos.

		Variables		Pino						Euca			
#	H(0) (%)	radio (cm)	#/ excelente	%	#/ buena	%	#/ regular	%	#/ deficiente	%	#/ deficiente	%	
36,5%	19	H<15	20	1	5,3%	3	15,8%	3	15,8%	9	47,4%	3	15,8%
26,9%	14		25			1	7,1%	3	21,4%	10	71,4%		
1,9%	1		30					1	100,0%				
1,9%	1		40	1	100,0%								
11,5%	6		45			1	16,7%	3	50,0%	1	16,7%	1	16,7%
21,2%	11	54	2	18,2%			3	27,3%	1	9,1%	5	45,5%	
<b>80%</b>	<b>52</b>		4	7,7%	5	9,6%	13	25,0%	21	40,4%	9	17,3%	
		15<H<20	20										
			25										
			30										
			40										
100%	1		45				1	100%					
<b>2%</b>	<b>1</b>						1	100%					
16,7%	2	20<H	20								2	100,0%	
			25										
16,7%	2		30						2	100,0%			
			40										
33,3%	4		45	2	50,0%			2	50,0%				
33,3%	4	54	4	100,0%									
<b>18%</b>	<b>12</b>		6	50,0%		0,0%	2	16,7%	2	16,7%	2	16,7%	
<b>100%</b>	<b>65</b>		10	15,4%	5	7,7%	16	24,6%	23	35,4%	11	16,9%	

# cantidad de probetas

#/ cantidad de probetas por categoría

### 4.3 Total de ensayos válidos en pino.

Tabla 3. Total de ensayos válidos en pino.

		Variables		Pino							
#	H(0) (%)	radio (cm)	#/ excelente		#/ buena		#/ regular		#/ deficiente		
37,2%	16	H<15	20	1	6,3%	3	18,8%	3	18,8%	9	56,3%
32,6%	14		25			1	7,1%	3	21,4%	10	71,4%
2,3%	1		30					1	100,0		
2,3%	1		40	1	100%						
11,6%	5		45			1	20,0%	3	60,0%	1	20,0%
14,0%	6		54	2	33,3%			3	50,0%	1	16,7%
<b>80%</b>	<b>43</b>			<b>4</b>	<b>9,3%</b>	<b>5</b>	<b>11,6%</b>	<b>13</b>	<b>30,2%</b>	<b>21</b>	<b>48,8%</b>
		15<H<2	20								
			25								
			30								
			40								
100%	1		45					1	100%		
			54								
<b>2%</b>	<b>1</b>						<b>1</b>	<b>100%</b>			
		20<H	20								
			25								
20,0%	2		30							2	100,0
			40								
40,0%	4		45	2	50%			2	50,0%		
40,0%	4		54	4	100%						
<b>19%</b>	<b>10</b>			<b>6</b>	<b>60,0%</b>			<b>2</b>	<b>20,0%</b>	<b>2</b>	<b>20,0%</b>
<b>100%</b>	<b>54</b>			<b>10</b>	<b>18,5%</b>	<b>5</b>	<b>9,3%</b>	<b>16</b>	<b>29,6%</b>	<b>23</b>	<b>42,6%</b>

# cantidad de probetas

#/ cantidad de probetas por categoría

#### 4.4 Total de ensayos válidos en eucalipto.

Tabla 4. Total de ensayos válidos en eucalipto.

		Variables		Euca	
	#	H(0) (%)	radio (cm)	# / deficiente	
5,8%	3	H<15	20	3	100%
			25		
			30		
			40		
1,9%	1		45	1	100%
9,6%	5		54	5	100%
<b>82%</b>	<b>9</b>			<b>9</b>	
		15<H<20	20		
			25		
			30		
			40		
			45		
			54		
	0				
18,2%	2	20<H	20	2	100%
			25		
	0		30		
			40		
	0		45		
	0		54		
<b>18%</b>	<b>2</b>			<b>2</b>	<b>100%</b>
<b>100%</b>	<b>11</b>			<b>11</b>	<b>17%</b>

# cantidad de probetas

# / cantidad de probetas por categoría

#### 4.5 Incidencia del radio.

Tabla 5. Incidencia del radio.

radio (cm)	20	25	30	40	45	54
# / deficiente	9	10	2		1	1
# / regular	3	3	1		6	3
	75,0%	92,9%	100,0%		70,0%	40,0%
# / buena	3	1			2	
# / excelente	1			1	1	6
	25,0%	7,1%		100,0%	30,0%	60,0%

# / cantidad de probetas por categoría

Del análisis general de los resultados obtenidos y del estudio independiente de la variable Radio, podemos establecer que, a partir del radio de 54cm, se revierte la tendencia de ocurrencia de colapsos: para este radio se obtuvo mayor cantidad de resultados en la categoría 3 que en las categorías 1 y 2.

#### 4.6 Contenido de humedad de la madera.

Tabla 6. Incidencia del contenido de humedad de la madera.

		H<15%																20<H%									
# / deficiente	81,3%	9,2	9,4	10,1	10,5	10,8	10,8	10,9	10,9	11	11	11	11,3	11,5	11,6	11,8	11,8	12,2	12,6	13,7	14,7	8,7%	28,1	28,5			
# / regular	92,8%	10,4	10,4	10,7	10,8	11,3	11,4	11,4	11,9	12,1	12,8	13,7	14,2	14,5	15							6,3%	29,5				
	<b>92,3%</b>																					<b>7,7%</b>					
# / buena	83,3%	10,3	11,4	11,5	11,8	13,1																16,7%	28,2				
# / excelente	44,4%	9,3	10,8	11,6	13,6																	55,6%	22	25,5	33,4	45,2	49,4
	<b>60,0%</b>																					<b>40,0%</b>					

# / cantidad de probetas por categoría

Si consideramos que, a mayor contenido de humedad de las muestras, mayor probabilidad de obtener mejores resultados, la variable Contenido de Humedad, analizada de forma independiente, aporta información contradictoria: el 60% de los resultados en las categorías 2 y 3 se obtuvieron con probetas con contenidos de humedad menores al 15%; contra un 40% con probetas con humedad mayor al 20%

Podemos suponer que esta contradicción obedece a un factor cuantitativo: la cantidad de probetas ensayadas con humedad mayor a 20% es significativamente menor.

La siguiente tabla muestra los promedios de contenido de humedad (%) de las probetas ensayadas de pino y eucalipto, antes del proceso de vaporizado ( $H_0$ ) y luego del él ( $H_1$ ), disgregados en  $H_0 < 20\%$  y  $20\% < H_0$ .

Cuando  $H_0 < 20\%$ , el aporte de humedad del proceso de vaporizado para las muestras de pino y eucalipto fue del orden 2.4% y 3.2% respectivamente. Cuando  $20\% < H_0$ , puede observarse que el

proceso de vaporizado actúa secando la madera, disminuyendo el contenido de humedad en 1.7% para pino y 8.6% para eucalipto.

Tabla 7. Aporte de humedad del proceso de vaporizado.

	$H_0 < 20\%$	$H_1$	$\Delta$	$20\% < H_0$	$H_1$	$\Delta$
pino	11.6	14.0	2.4	32.7	30.9	-1.7
eucalipto	10.5	13.8	3.2	25.2	16.7	-8.6

#### 4.7 Incidencia de la posición de la probeta respecto el molde.

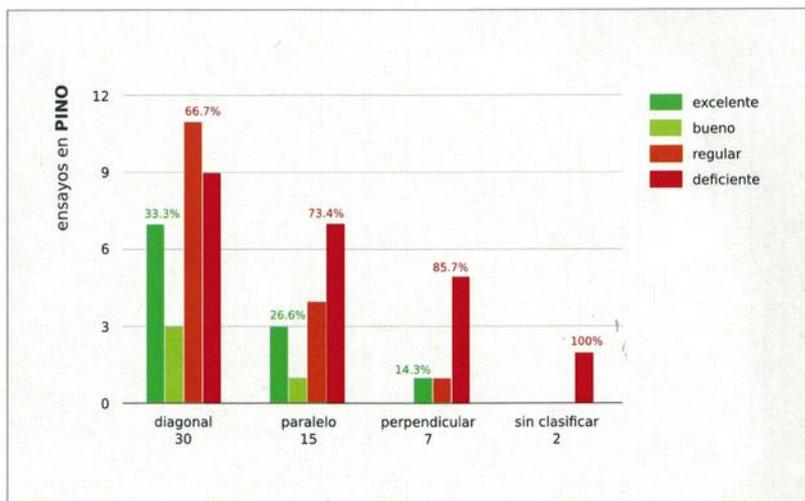


FIGURA 20. Incidencia de la posición de los anillos.

Se buscó que la disposición de los anillos de crecimiento de las probetas, en lo posible, fuese paralela al molde. Los ensayos que se realizaron con disposición perpendicular fueron por errores de operación. El análisis de la disposición de los anillos de crecimiento comprueba lo expuesto por Araya (2005): si son dispuestos de forma paralela a la cara del molde, los resultados serán sensiblemente mejores que con los anillos perpendiculares.

#### 4.8 Variación del radio por tensión residual.

Se verificó la variación del radio (efecto de la memoria elástica residual del material) en probetas de pino con calificación 2 y 3 y que conformaron una semicircunferencia. Se encontró una deformación promedio del orden del 12%.

Tabla 8. Variación del radio por tensión residual.

fecha del ensayo	sección (mm)	género	radio (cm)	variación del radio				calificación	
				fecha de medición	cuerda <sub>(i)</sub> (cm)	cuerda <sub>(f)</sub> (cm)	$\Delta$		
26 ene.	22	Pino	25	3 abr.	54,4	59,2	4,8	8,8%	2 buena
3 feb.	25	Pino	20	3 abr.	40,6	46,1	5,5	13,5%	2 buena
3 feb.	25	Pino	20	3 abr.	40,6	46,5	5,9	14,5%	2 buena
5 feb.	25	Pino	20	3 abr.	40,6	45,4	4,8	11,8%	3 excelente
Promedio:							5,3	12,2%	

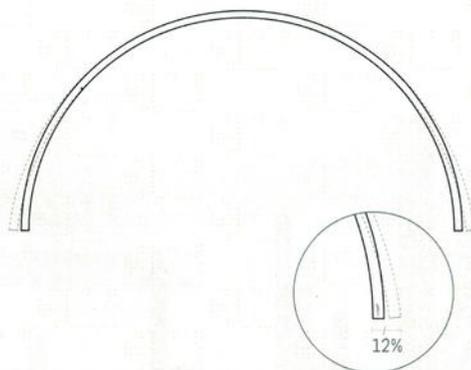


FIGURA 21. Variación del radio.

#### 4.9 Fuerza aplicada

Las probetas ensayadas en los radios de 45 y 54cm fueron tensadas con una carga de 80kg, equivalente a una fuerza de 784.8N.

Esta carga no fue suficiente para cerrar la semicircunferencia en los ensayos con radios menores.

CAPÍTULO V  
DISCUSIÓN

## 5.1 Discusión del proceso

Los resultados obtenidos no son concluyentes en lo que a los radios mínimos refiere.

Las causas de la indeterminación tiene su origen en el planteo, desafortunado, que los radios mínimos de curvatura para las especies ensayadas se encontraban en el entorno de los 20-30cm; y en la incapacidad de las herramientas construidas de admitir los incrementos no previstos de los radios de curvatura.

A continuación se detalla el proceso de realización de los ensayos y las causas que provocaron la indeterminación de los resultados.

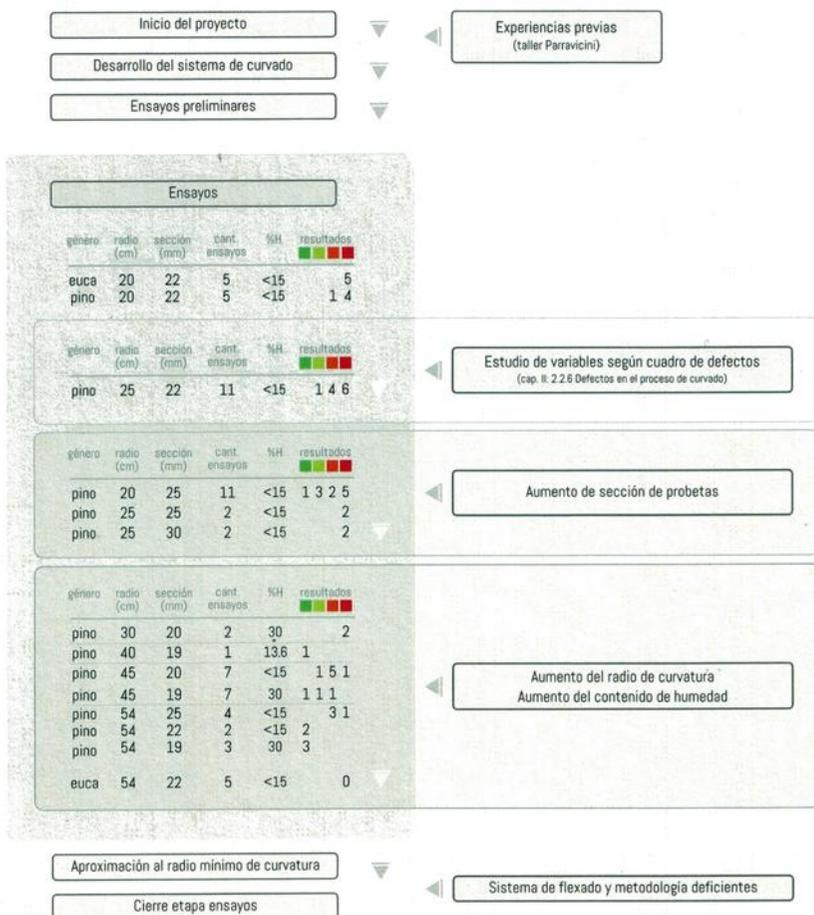


FIGURA 22. Esquema del proceso de ensayo.

### 5.1.1 Inicio del proyecto.

La hipótesis planteada, que los radios mínimos de curvatura para las probetas de pino y eucalipto están en el umbral de los 20-30 cm, surgió de los ensayos previos realizados en el taller Parravicini.

En la bibliografía consultada se encontraron tablas que establecen radios mínimos de curvatura para un conjunto variado de especies. En particular, en la tabla que presenta Araya (2005), tomada de Stevens (1972), figura el *Eucalyptus pilularis* con un radio de curvatura mínimo de 61cm, con fleje, para madera de 25.4mm de espesor. En la tabla de Gatto (2006), tomada de Vorreiter (1958), el *Pinus caribaea* tiene un radio de curvatura mínimo de 35.6cm y el *Eucalyptus pilularis* de 58.4cm, ambos con faja de apoyo y para espesores de 25.4mm, con colapsos admitidos hasta en un 5% de las piezas curvadas.

La asociación por familia del radio mínimo de curvatura del *Eucalyptus grandis* con el del *Eucalyptus pilularis*, para el planteo de la hipótesis, hubiera sido más aproximada.

Por otro lado, el *Picea excelsa*, es una conífera de la familia de las pináceas, como el *Pinus elliotii*, lo que se desconocía al momento de formular la hipótesis. En la tabla de Gatto (2006), el *Picea excelsa* figura con un radio mínimo de curvatura de 76.2cm, que podría estar muy próximo al radio del *Pinus elliotii*.

### 5.1.2 Desarrollo del sistema de curvado.

La cámara de vaporizado y el sistema de arcos, para el flexado de probetas en diferentes radio, se construyeron bajo el criterio de aprovechamiento del material con el que se contaba. Las dimensiones proyectadas de las herramientas a partir del material disponible fueron consistentes con la idea de plantear un entorno de 20-30cm como valores de referencia en el sistema de radios variables. Así, se construyó una cámara de vaporizado de 120cm de largo y se plantearon arcos de circunferencia de 10, 15, 20, 25, 27.5, 30, 32.5 y 35cm radio.

Para todos los radios planteados, las dimensiones definidas para las probetas permitían desarrollar una semicircunferencia.

### 5.1.3 Ensayos preliminares.

Una vez construidas las herramientas necesarias para realizar los ensayos, se hicieron pruebas preliminares con probetas de pino de 25mm de sección (material que se encontraba en el taller). Se hicieron 3 ensayos con radio de 25cm y los resultados, según la clasificación planteada, fue de 3 (excelente) para todas las muestras.

### 5.1.4 Ensayos.

En este marco y luego de la pre entrega de tesis, dieron comienzo los ensayos.

Los primeros ensayos fueron para ambas especies con un radio de 20cm; todas las probetas colapsaron, recibiendo calificaciones de 0 (deficiente) y 1 (regular). Dos muestras de eucalipto fueron sumergidas en agua aproximadamente 20hs, para aumentar el contenido de humedad; los resultados fueron iguales.

Se esperaba que al aumentar el radio a 25cm, con pino, se repitieran los resultados obtenidos en los ensayos preliminares. Sin embargo, de las tres primeras pruebas realizadas, una sólo obtuvo calificación 2.

#### **5.1.5 Estudio de variables según cuadro de defectos.**

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos preliminares y buscando lograr resultados en las categorías 3 y 2 (excelente y bueno), se realizaron 8 ensayos más, modificando variables en el sistema (considerando el cuadro de posibles defectos durante el curvado de De Peres (2013)) :

- se probaron diferentes modos de vaporización de probetas: se aumentó y disminuyó el tiempo de vaporizado; (1min y 3min/mm espesor); se colocaron las probetas en cámara al inicio del vaporizado y después de precalentar previamente la cámara.
- se aumentó del contenido de humedad por inmersión;
- se aumentó el radio;
- se redujo la velocidad de sollicitación del esfuerzo de flexión;
- se agregó un segundo generador de vapor, con la intención, sin éxito, de aumentar el volumen de vapor que ingresaba a la cámara y aumentar así el contenido de humedad de la madera.

Las calificaciones de los 8 ensayos fueron de 0 y 1.

#### **5.1.6 Aumento de sección de probetas.**

Considerando que los ensayos preliminares se realizaron con muestras de 25mm de espesor (3mm más gruesas), se decidió elaborar nuevas probetas de pino con espesores de 25mm y posteriormente de 30mm. Se hicieron 11 pruebas con radio de 20cm, y sección de 25mm, de las que se obtuvieron únicamente 4 con calificaciones 3 y 2. El porcentaje de ensayos sin rotura fue bajo y los resultados dispersos.

Se realizaron otras 4 pruebas con radio de 25cm y espesores de 25 y 30mm; la calificación fue, en todos los casos, 0.

#### **5.1.7 Aumento del radio de curvatura y del contenido de humedad.**

Dieste sugiere que los radios de curvatura trabajados son chicos y aporta nueva información sobre las condiciones de humedad de la madera; bibliografía consultada expresa que la madera (secada al aire) con un contenido de humedad de entre 17 y 25% es más adecuada para curvado.

Esta información concuerda con lo planteado en la sección 2.2.5.3 Contenido de humedad.

Dieste propone entonces aumentar el radio de curvatura al entorno de los 50cm y trabajar con madera "verde" (tablas de encofrado), que posee un contenido de humedad en el entorno del 30%.

Las tablas de encofrado adquiridas permitieron secciones de 19 y 20mm; no fue posible con este material mantener las dimensiones de las probetas planteadas inicialmente (22mm de sección)

#### **5.1.8 Aproximación al radio mínimo de curvatura.**

En las condiciones planteadas en el punto anterior, se obtuvieron resultados satisfactorios con pino para el radio de 54cm: 4 ensayos con calificación 3 (excelente).

No fue posible conseguir escuadrías de eucalipto con saturación de humedad para obtener nuevas probetas; por lo tanto, se probó el radio de 54cm con material ya existente (escuadrías secas,  $H=10-12\%$ , de 22mm de sección); todos los resultados fueron calificados con 0 (deficiente).

#### 5.1.9 Sistema de flexado y metodología deficientes.

Las herramientas construidas para el vaporizado y flexado de las probetas presentaron limitaciones para recibir los nuevos radios de 40, 45 y 54cm:

- arcos mayores a 40cm de radio empiezan a quedar fuera de los límites del soporte de arcos; por lo que hubo que agregar accesorios;
- las longitudes de las semicircunferencias de los arcos de 40, 45 y 54cm (125.6, 141.3 y 169.56cm respectivamente) son mayores que el largo de las probetas con las que se estaba trabajando; los apoyos de la faja impedían que la probeta se cerrara sobre el arco; y
- la cámara de vaporizado recibe escuadrías de hasta 122cm de largo; por lo tanto, aumentar el largo de las probetas para los nuevos radios implicaba también modificar la cámara de vaporizado y la faja de apoyo;

Por lo tanto, dado que no se contaba con los recursos (económicos y tiempo) para realizar estas modificaciones, se optó por recortar los nuevos arcos

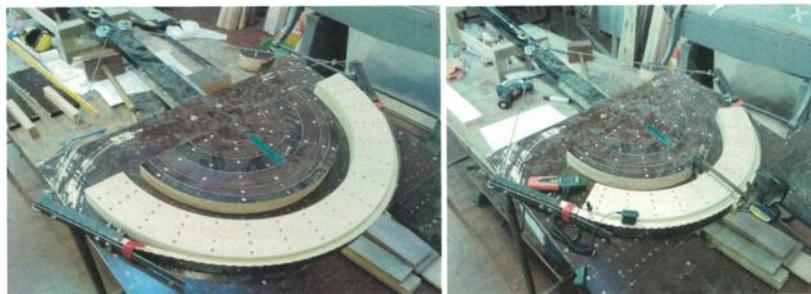


FIGURA 23. Discordancia entre el largo de la probeta, el fleje y el arco.  
Izq.: las longitudes de los arcos son mayores que las de las probetas; el fleje choca con el arco.  
Der.: se recortaron los arcos para continuar trabajando con los largos establecidos para las probetas.  
Fotografías del autor.

#### 5.1.10 Cierre etapa ensayos.

A estas alturas del desarrollo del proyecto, el marco metodológico había cambiado significativamente:

- la sección de las probetas era indefinida;
- no se contaba con madera saturada de eucalipto;
- no era posible conformar semicircunferencias con los nuevos radios y
- los esfuerzos de tensión para el flexado de arcos o segmentos de circunferencia son menores que los necesarios para el curvado de semicircunferencias.

Considerando, que las transformaciones necesarias para volver a condiciones óptimas de investigación, para los objetivos planteados, implicaban una nueva inversión de capital pero, sobre todo, gran cantidad de tiempo; y considerando también, que los objetivos académicos de un proyecto de investigación de tesis de grado habían sido alcanzados, se decidió dar por finalizada la etapa de ensayos.

## 5.2 Discusión de resultados.

### 5.2.1 Sobre las herramientas construidas.

La cámara de vaporizado y el sistema de flexado funcionaron correctamente, según requisitos planteados y función prevista.

No se tuvo acceso a instrumental para medir el contenido de humedad en el interior de la cámara. Debido a la temperatura que alcanza, no es posible utilizar equipos convencionales. En conversación mantenida Alfredo Da Cunda (de Electronia S.R.L., representante para Uruguay de Onset - Hobo data loggers, instrumentos profesionales para medición y registro digital de datos), sostuvo que sería razonable suponer que se está trabajando en un ambiente con saturación de vapor (100%).

Al cierre del proyecto, el contrachapado utilizado para la construcción de la cámara comenzó a deteriorarse. El material absorbe por los cantos la humedad liberada por la cámara; es necesario que los cantos sean sellados.

Por otro lado, también se observó la formación de hongos en el interior de la cámara cuando esta permanece cerrada al terminar la operación; se deberá ventilar la cámara luego de utilizarla.

El fleje de acero mancha la madera, particularmente el eucalipto; es necesario realizar un recubrimiento resistente al desgaste y la humedad en la cara que está en contacto con la madera.

### 5.2.2 Humedad.

El aporte de humedad del sistema de vaporizado construido fue mínimo, del orden de 2.4% y 3.2% para pino y eucalipto respectivamente, para maderas con contenidos de humedad iniciales menores al 20%. Esto implica que, para alcanzar niveles de humedad de entre el 20 y el 30%, será necesario trabajar con madera "verde" o sumergida previamente en agua, entre 12 y 24hs.

Esto representa desventajas para el proceso de curvado:

- en las barracas de madera (de Montevideo) únicamente se consigue, con estos contenidos de humedad, tablas o tablones para encofrado, de pino. Estas tablas y tablones son de muy baja calidad y presentan gran cantidad de defectos (nudos, alabeos, falta de aristas, hongos, etc.); durante el flexado, algunos de estos defectos, como nudos o grietas, producen colapsos;
- hay que prestar especial atención al proceso de secado de las piezas curvadas, para evitar el ataque de agentes xilófagos y alabeos;

- según fuentes consultadas, el aumento del contenido de humedad por inmersión no es homogéneo, siendo preferible el uso de madera verde; en esta situación, no podría haber material de reserva, ya que se secaría.

Una alternativa sería trabajar con madera secada de forma natural, seleccionando el material en la bodega que tenga mayor contenido de humedad, y trabajar con radios de curvatura más grandes.

Para las probetas de pino y eucalipto con contenidos de humedad mayores a 20%, el proceso de vaporizado disminuyó la humedad de las muestras, en un 1.7 para pino y 8.6 para eucalipto. Esto puede explicarse por el hecho que el aire caliente necesita una cantidad mayor de agua para alcanzar el estado de saturación (100% de humedad) que el aire frío, por lo tanto, absorbe mayor cantidad de agua de la madera<sup>24</sup>. Al mismo tiempo, según la gráfica de curvas de equilibrio higroscópico de la madera (KOLLMANN, 1959), entre los 90° y 100°C, el contenido de humedad de equilibrio de la madera se encuentra entre 22% y 23% (ver gráfica en anexos).

La diferencia significativa en la reducción del contenido de humedad de las muestras de pino (1.7%) y eucalipto (8.6%) puede explicarse por el hecho que el eucalipto absorbió agua por inmersión, por lo tanto, de forma superficial y heterogénea (agua ligada), mientras que el pino se encontraba en estado de saturación de humedad de la fibra.

---

<sup>24</sup> Fuente: La humedad de la madera. [En línea]  
[http://64.76.123.202/new/0-0/forestacion/\\_archivos/\\_biblioteca/116%20%20X\\_%20Secado%20tradicional%20de%20eucalipto%20Gottter.pdf](http://64.76.123.202/new/0-0/forestacion/_archivos/_biblioteca/116%20%20X_%20Secado%20tradicional%20de%20eucalipto%20Gottter.pdf) [Consulta: 2 junio 2015].

CAPÍTULO VI  
CONCLUSIONES

Respecto los objetivos planteados, se entiende que se lograron contribuciones al conocimiento de la aptitud al curvado de los géneros ensayados.

Los resultados obtenidos no son concluyentes respecto la definición de los radios mínimos de curvatura. Podemos estimar que el radio mínimo de curvatura de escuadrías de pino de 19mm de espesor, con contenido de humedad en el entorno del 20%, está próximo a los 60cm.

No estamos en condiciones de estimar el radio mínimo de curvatura para el eucalipto; podemos afirmar que este género presenta menor aptitud para el curvado y, por lo tanto, el radio mínimo será superior a los 60cm.

El valor mínimo estimado para el radio de curvatura de escuadrías de pino tendrá una instancia de validación en una etapa posterior, con el desarrollo de un prototipo para el proyecto EMPRENUR, que, a la fecha de cierre de este trabajo, se encuentra en ejecución.

Sobre las herramientas desarrolladas. Tanto la cámara de vaporizado como el sistema de flexado funcionaron correctamente y según lo previsto.

El contenido de humedad del material al momento del flexado, deberá estar en el entorno del 20%. Es necesario trabajar con madera secada naturalmente y seleccionar en la barraca el material con mayor contenido de humedad.

No es recomendable trabajar con madera de pino verde para aplicaciones donde la apariencia de la madera sea importante. Con contenidos de humedad en el entorno del 30%, la madera de pino es atacada fácilmente por hongos.

Para la operación de flexado, el material tiene mejor comportamiento cuando la disposición de los anillos de crecimiento no es perpendicular al molde; y es imprescindible el uso de una faja de apoyo.

Las muestras de pino (ensayos válidos con calificaciones 2 y 3, que conformaron un semicírculo) sufrieron una variación promedio del radio del orden del 12%. Esta variación deberá ser contemplada en el molde, si la pieza en servicio no tendrá sujeción.

Como corolario del proyecto, cabe destacar que las herramientas y conocimientos desarrollados tuvieron continuidad en el curso Laboratorio de Tecnología de la Madera, donde estudiantes interesados en el proceso desarrollaron diversas experiencias de curvado.

La primera aplicación de producto fue propuesta por Joaquín Díaz, estudiante de la EUCD, quien incorpora como insumo de diseño, para su proyecto de cierre de curso de la asignatura Diseño y Creatividad III (3er año de la carrera de Diseño Industrial), un pieza de pino curvada. (Su propuesta busca reutilizar y resignificar los moldes utilizados para la producción de piezas cerámicas para vajilla de la empresa OLMOS).



FIGURA 24. Lámpara OLMOS.  
Fotografía: Joaquín Díaz.

A continuación se presenta un cuadro con un resumen de los resultados, relevamientos y experiencias más significativos del trabajo, a modo de guía rápida para futuros desarrollos en curvado de madera maciza de producción nacional.

características del material a curvar	libre de defectos		
	20% < contenido de humedad < 30%		
temperatura de la cámara de vapor	90 - 98°C		
tiempo de precalentado de la cámara	70min (para la herramienta construida en el proyecto)		
tiempo de vaporizado del material	2min/mm de espesor		
uso de banda de apoyo	indispensable		
posición de la pieza para el flexado	ajuste preciso entre topes de la banda de apoyo anillos NO perpendiculares al molde		
radio mínimo de curvatura	Nombre científico	Nombre común	r <sub>min</sub> (cm)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- vaporizadas</li> <li>- flexadas con feja de apoyo</li> <li>- espesor: 25mm</li> <li>- espesor Eucalyptus grandis: 22mm</li> <li>- espesor Pinus eliottii: 19mm</li> </ul>	Podocarpus guatemalensis	pinotea, cipresillo	86.4
	Picea excelsa	picea, abeto falso	76.2
	Eucalyptus grandis	eucalipto	r > 60
	Pinus eliottii	pino	aprox. 60
	Eucalyptus obliqua	messmate, roble de Australia	58.4
	Eucalyptus pilularis	eucalipto blackbutt	40.6
	Pinus caribaea	pino macho	36.6
	Fagus sylvatica	haya	10.2
Quercus robur	roble	5.1	
secado	la pieza deberá alcanzar el equilibrio higroscópico bajo esfuerzo de flexión		
variación del radio luego del secado	12% (en pino)		
ventilación	mantener la cámara abierta luego de la operación		

FIGURA 25. Guía de proceso.

El presente documento, así como otros contenidos relacionados al proyecto, pueden consultarse y descargarse de forma libre y gratuita desde el blog <http://desarrolloruquay.wix.com/curvadomadera>

CAPÍTULO VII  
APLICACIÓN

Para esta etapa, se presentó, junto a la arq. Vera Alaniz, con la tutoría de Federico Vaz y con el apoyo del CDU (Cámara y Conglomerado de Diseño del Uruguay), LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay) y Barraca Placamadera, la propuesta "AGREGADO DE VALOR A MADERA MACIZA DE pino DE PRODUCCIÓN NACIONAL A TRAVÉS DEL DESARROLLO DE CONFORMADOS DE CURVATURAS COMPLEJAS" al llamado a Proyectos y Prototipos con Potencial Emprendedor, que realizara EMPRENUR en enero del presente año. Dicho proyecto propone la realización de un prototipo enfocado a mobiliario capaz de exponer la validez y potencialidad del proceso de curvado aplicado a madera de pino de producción nacional. El proyecto fue aprobado y se encuentra en ejecución.

La intención de diseño para la aplicación en productos de piezas curvadas es aprovechar las características que aporta la tecnología del curvado al material, destacando principalmente 3 atributos:

1. la curvatura, aplicada en piezas donde sus propiedades son necesarias o imprescindibles, por ejemplo a respaldos ergonómicos o movimientos de balancín;
2. la posibilidad de prescindir de uniones de madera, mecánicas o químicas para el vínculo de partes; y
3. el potencial tecnológico de la transformación del material sin mecanizados por desbaste, que se traduce en ahorro de energía y material.

En este sentido, las referencias más interesantes que se encontraron, a nivel de mobiliario, están dadas por sillas:



FIGURA 26. Sillas referentes.  
Izq. Fuente: <http://jaroslavjurica.com>  
Cen. Fuente: <http://de.shop.thonet.de>  
Der. Fuente: <http://www.bonluxat.com>

Sin embargo, los radios de curvatura posibles de lograr con pino no permiten el desarrollo de aplicaciones similares. De hecho, dadas las dificultades surgidas durante la investigación, el proyecto de EMPRENUR tendrá una instancia previa de validación de los resultados.

La propuesta de producto estará supeditada a dicha instancia de validación y será definida durante el desarrollo del proyecto; sin embargo, podemos suponer la factibilidad de lograr tipologías de productos semejantes a las siguientes, con arcos de curvatura de radios superiores a los 65cm:



FIGURA 27. Mapa de productos.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAYA, CRISTIAN MARTÍN. "Determinación de características de curvado de madera sólida para las especies *Nothofagus pumilio* (Lenga) y *Laurelia philipiana* (Tepa)" [Tesis]. Santiago de Chile: Universidad Tecnológica Metropolitana. 2005.
- BENSON, JONATHAN. "Woodworker's Guide to Bending Wood: Techniques, Projects, and Expert Advice for Fine Woodworking". Fox Chapel Publishing Company. 2008.
- CALDERÓN, ALBERTO D. "Cuadernos de dasonomía. Serie didáctica nº 13. Secado de la madera". Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Cuyo. Argentina. s.f.
- CHACA ESPINOZA, WILMER. "Manual para el curvado de madera y MDF". [Tesis]. Cuenca, Ecuador: Universidad del Azuay. 2012.
- CHAVES, FERNANDO. "Revisión bibliográfica sobre curvado de madera" [Monografía]. Montevideo, Uruguay. Facultad de Ingeniería. 2014.
- COTTEY, JAMES H.JR. "The bending of wood with steam". [Tesis]. Faculty of the School of the Arts of Virginia Commonwealth University. Richmond, Virginia. 1975.
- DE CASTRO, RAÚL. "Humedad de equilibrio de madera de pino y eucalipto en seis sitios de Uruguay" [Diapositiva]. LATU. Departamento de Productos Forestales.
- DE PERES, MATHEUS LEMOS, et al. "Vergamento de madeira sólida: qualidade de processo e matéria-prima". Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. 2013.
- DE PERES, MATHEUS LEMOS, et al. "Análise dos defeitos de vergamento da madeira de *Eucalyptus grandis*". Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.
- DIESTE, ANDRÉS. "Plan de inversiones en maquinaria y equipos". Dirección Nacional de Industrias; Ministerio de Industrias, Energía y Minería; Consejo Sectorial Forestal-Madera. 2012.ptus
- DIESTE, ANDRÉS. "Programa de promoción de exportaciones de productos de madera". Dirección Nacional de Industrias; Ministerio de Industrias, Energía y Minería; Consejo Sectorial Forestal-Madera. 2012.
- GABINETE PRODUCTIVO. "Planes industriales-Fase 1. Parte 2. Plan sectorial forestal-madera". Ministerio de Industria, Energía y Minería MIEM. 2012.

GATTO, DARCI ALBERTO. "Características tecnológicas do vergamento das madeiras de *Luehea divaricata*, *Carya illinoensis* e *Platanus xacerifolia* como subsidios para o manejo florestal". [Tesis de doctorado]. Santa Maria, RS, Brasil. Universidade Federal de Santa Maria. 2006.

HERNÁNDEZ MALDONADO, SAÚL. "Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones". [Tesis]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. "Uruguay en cifras 2013". 2013.

LEMOINE, TRUETT J.; KOCH, PETER. "Steam bending properties of southern pine." *Forest products journal*. Vol. 21, N° 35. 1971.

MINISTERIO DE INDUSTRIA. "Plan Estratégico Industrial 2020. Capítulo 5: Foresto-industrial". Argentina. 2012.

NICOLA, CARLO; MENINI, AGUSTÍN. "Usos no convencionales de maderas nacionales para la fabricación de muebles de diseño." *Proyecto Fundación Ricaldoni*. 2011.

OLGUÍN CERÓN, J. B.; SOTOMAYOR CASTELLANOS, J. R. "Plastificado higro-térmico de madera de *Quercus scytophylla*". En: *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. Setiembre - diciembre 2013. n° 59, pp 24-32.

PECK, EDWARD C. "Bending solid wood to form" *Agriculture Handbook N° 125*. United States Department of Agriculture. Estados Unidos. 1957.

STARK, OSCAR. "Diagnóstico del sector madera y muebles del Mercosur". Documento de trabajo N° 011/04. Secretaría del Mercosur. Sector de Asesoría Técnica. Consultoría Económica. 2004.

VIGNOTE PEÑA, SANTIAGO; MARTÍNEZ ROJAS, ISAAC. "Tecnología de la madera". 3ª ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 2006

URUGUAY XXI (Instituto de Promoción de Inversiones y Exportaciones de Bienes y Servicios). "Sector Forestal. Oportunidades de Inversión en Uruguay". 2011.

#### Web.

Publicaciones técnicas del Departamento de Forestales del LATU.  
[http://catalogo.latu.org.uy/index.php?lvl=etagere\\_see&id=14](http://catalogo.latu.org.uy/index.php?lvl=etagere_see&id=14)

The wood database.  
<http://www.wood-database.com/>

# GLOSARIO

Anisotropía	Característica de la materia según la cual sus propiedades varían según la dirección en que son examinadas.
Carpintería de ribera	Construcción de obras navales.
Derivados de madera	Productos fabricados a partir de restos o residuos producidos por la transformación de la madera y adhesivos aglutinantes: tableros de partículas (MDF, aglomerado, Duraboard, etc. Este término se utiliza en oposición a madera maciza y madera de ingeniería.
Escuadría	Conjunto de las dos dimensiones de la sección transversal de una pieza de madera.
Madera anhidra	Madera que no contiene humedad.
Madera de ingeniería	Productos fabricados mediante la combinación de madera sólida y adhesivos para mejorar las propiedades mecánicas del producto final: tableros o vigas de madera maciza (Finger joint), multilaminados, etc. Este término se utiliza en oposición a madera de maciza y derivados de madera.
Madera rolliza	Troncos de árboles cortados a largo uniforme para aprovechamiento industrial.
Madera sólida o maciza	Madera tal como se encuentra en la naturaleza, aserrada y seca. Este término se utiliza en oposición a madera de ingeniería y derivados de madera.
Plastificado	Proceso de mejora de las cualidades plásticas de la madera.
Prensa con membrana	Sistema mediante el cual una membrana, por aplicación de vacío, ejerce presión sobre las piezas a curvar hasta adoptar la forma del molde.
Riostra	Pieza que, puesta oblicuamente, asegura la invariabilidad de forma de una armazón.
Sargento	Prensa manual de carpintería.
Suavizado	Sinónimo para "plastificado".
Vaporizado	Plastificar la madera con vapor de agua.
Violería	Fabricación de instrumentos de cuerda.

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Comparación de radios de curvatura por especie	25
Tabla 2	Total de ensayos válidos	39
Tabla 3	Total de ensayos válidos en pino	40
Tabla 4	Total de ensayos válidos en eucalipto	41
Tabla 5	Incidencia del radio	42
Tabla 6	Incidencia del contenido de humedad de la madera	42
Tabla 7	Aporte de humedad del proceso de vaporizado	43
Tabla 8	Variación del radio por tensión residual	44

# ANEXOS

- Tipos de procesos de curvado
- Escala de calificación de probetas
- Ficha de registro de tablas de madera
- Ficha de registro de ensayos
- Especificaciones técnicas de la cámara de vaporización
- Especificaciones técnicas del sistema flector
- Análisis de datos del sistema
- Tabla de radios límites de curvatura.
- Lista simplificada de piezas de sección rectangular de maderas fabricadas en Uruguay
- Curvas de equilibrio higroscópico de la madera
- Ficha de datos de ensayos

## Tipos de procesos de curvado.

### MADERA VERDE.

Algunas especies de madera (Abedul, Haya, Nogal, Sauce) son fácilmente curvables en estado verde sin necesidad de agregado de humedad o temperatura (BENSON, 2008).

Aplicación únicamente a nivel artesanal.

#### VENTAJAS

- Costo.
- No necesita pre tratamiento.

#### DESVENTAJAS

- Madera con alto contenido de humedad secada al aire libre.
- Elevada memoria elástica.
- Inestabilidad mecánica de las piezas.
- No permite el uso de adhesivos.



BENSON (2008)



## CURVADO LAMINAR.

Consiste en ejercer presión a un conjunto de láminas de madera de entre 1 y 3mm de espesor a las que se les aplicó previamente un adhesivo. Este sistema permite el uso tanto de madera maciza (láminas y compensados) como de madera sólida.

Puede desarrollarse tanto a nivel artesanal como industrial.

### VENTAJAS

- Admite radios de curvaturas sumamente reducidos (desde 1 cm), dependiendo del espesor de las láminas.
- Permite el prensado con membrana por vacío, eliminando el uso de sargentos y la necesidad de contramolde.
- Mantiene la forma luego de liberar el molde; el retorno elástico es mínimo.
- Permite el curvado de grandes superficies.
- Admite, en condiciones especiales, dobles curvaturas.

### DESVENTAJAS

- Consume gran cantidad de adhesivo.
- La laminación de madera sólida conlleva un gran consumo de energía y desperdicio de material por corte.



Izq.: <http://sandal-woodsblog.com/wp-content/uploads/2010/06/table-curves-gluing.jpg>  
Der.: [http://craftcouncil.org/sites/craftcouncil.org/files/Origins-Alvar-Aalto\\_0.jpg](http://craftcouncil.org/sites/craftcouncil.org/files/Origins-Alvar-Aalto_0.jpg)

## ENTALLADURA.

Es uno de los métodos más antiguos; consiste en desbastar el material mediante cortes controlados en la madera.

Aplicable a procesos industriales y artesanales.

### VENTAJAS

- No requiere molde.
- En condiciones especiales, permite dobles curvaturas.
- Permite el curvado de grandes superficies.

### DESVENTAJAS

- Consumo de energía por realización de cortes.
- Cortes visibles.
- Debilitamiento del material.
- Una curvatura precisa y resistente requiere de cálculos de profundidad y distancia entre cortes.



Izq.: <http://bloggingwv.com/wp-content/uploads/2013/06/Kerf-Cut-Bending-Lead.jpg>

Cen.: <http://2.design-milk.com/images/2013/04/kerfchair-chair-boris-goldberg-detail.jpg>

Der.: [http://40.media.tumblr.com/bc4cff9c254b6a017b23ab60fee1cb4c/tumblr\\_mjf5zx8P621qd0edbo1\\_500.jpg](http://40.media.tumblr.com/bc4cff9c254b6a017b23ab60fee1cb4c/tumblr_mjf5zx8P621qd0edbo1_500.jpg)

## INMERSIÓN.

Consiste en aumentar el contenido de humedad de la pieza a curvar sumergiendola en agua. La madera húmeda pierde resistencia mecánica y mejora su flexibilidad.

Puede bañarse en agua a temperatura ambiente o caliente; el agua caliente disminuye el tiempo de inmersión que, en agua caliente a 98°C, es de 12 a 15 minutos por cm de espesor, dependiendo de la especie (GATTO, 2006).

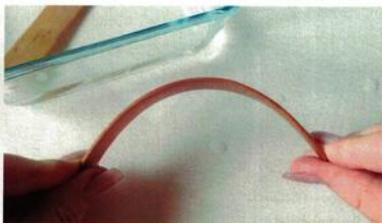
Este método es de aplicación únicamente artesanal.

### VENTAJAS

- Simplicidad.

### DESVENTAJAS

- Aumenta el tiempo de secado.



Izq.: <http://mollymooecrafts.com/wp-content/uploads/2013/07/craft-stick-shaping4.jpg>

Der.: <http://mollymooecrafts.com/wp-content/uploads/2013/07/popsicle-stick-bracelets.jpg>

## TRATAMIENTO QUÍMICO.

La madera recibe un pre tratamiento de inmersión o vaporización con agregados químicos: amoníaco, urea e hidróxido de sodio (soda cáustica).

Existe un proceso patentado de inmersión en amoníaco anhidro líquido, a  $-33^{\circ}\text{C}$  de temperatura. La madera es suspendida en este baño durante unos minutos; en cuanto se evapora el amoníaco, se endurece. Los resultados han sido satisfactorios con Fresno, Abedul y Olmo, pero sólo en espesores hasta 3,2 mm. Es un sistema de aplicación industrial únicamente y sus costos son sumamente elevados. Se han estudiado otros químicos para el tratamiento, pero los resultados no han sido significativos (ARAYA, 2005).

Investigaciones realizadas por PECK (1957) y en el Laboratorio de Productos Forestales de Inglaterra (ARAYA, 2005) demostraron que los procesos de plastificación no mejoran con aditivos químicos.

### VENTAJAS

### DESVENTAJAS

- Dependiendo del proceso, altos costos y aplicación restringida.
- Cambio de color de la madera.



<http://wst.icfre.gov.in/divisions/wpu/images/Plasticisation%20Unit-2.jpg>

## PRE COMPRESIÓN.

Es un tratamiento que se aplica a determinadas especies de madera sólida; consiste en vaporizar la pieza, aumentando su contenido de humedad para luego comprimirla un 20% en sentido longitudinal. La madera así procesada aumenta su flexibilidad pudiendo curvarse en frío y en seco. Espesores de hasta 20mm pueden curvarse a mano con gran facilidad.

Es un método industrial patentado y se comercializan hoy en día varias marcas de madera tratada (Bendywood; Compwood).

### VENTAJAS

- Admite varias instancias de curvado.
- No tiene aditivos químicos.
- Ahorro de tiempo, no requiere procesos previos al curvado.

### DESVENTAJAS

- Costos.



Izq.: [http://cdn2.bigcommerce.com/server5400/98b58/product\\_images/uploaded\\_images/236-compwood-machine.jpg](http://cdn2.bigcommerce.com/server5400/98b58/product_images/uploaded_images/236-compwood-machine.jpg)

Der.: [http://cdn2.bigcommerce.com/server5400/98b58/product\\_images/uploaded\\_images/mroz-knot-700.jpg](http://cdn2.bigcommerce.com/server5400/98b58/product_images/uploaded_images/mroz-knot-700.jpg)

## MICROONDAS.

Este método consiste en calentar el agua que hay en el interior de la madera mediante ondas de radiofrecuencia para ablandar el material. En algunas maderas no demasiado permeables, como la Haya, el vapor generado en el interior de las células puede tener problemas para encontrar la salida del material provocando colapso en las paredes celulares (ARAYA, 2005).

Las prensas de radiofrecuencia son comunes en la industria del curvado laminar. Aunque estas se utilizan principalmente para disminuir el tiempo de fraguado de los adhesivos.

### VENTAJAS

- Rapidez.
- Calentamiento uniforme del material.

### DESVENTAJAS

- Altos costos de inversión.



Izq.: [http://www.eyehand.com/Marginalia/wp-content/uploads/2011/07/MicrowaveWood\\_0245.jpeg](http://www.eyehand.com/Marginalia/wp-content/uploads/2011/07/MicrowaveWood_0245.jpeg)  
Der.: <http://www.italpresse.com/files/catalogue/images/categories/medium/135.jpg>

## CALOR DIRECTO.

Es el proceso curvado de madera más antiguo. Consiste en calentar la madera sobre su lado cóncavo directamente sobre la fuente de calor, mientras se mantiene húmeda la cara convexa.

Fue comúnmente utilizado en carpintería de ribera. Aún se aplica en la industria de la tonelería para el curvado y tostado de las duelas.

### VENTAJAS

- Sencillez.
- No requiere secado.

### DESVENTAJAS

- Puede quemar el material.
- La temperatura no aplica de forma homogénea en el material.



Izq.: <http://www.terminalia.org/mad/54.jpg>

Der.: <http://1.bp.blogspot.com/-KQ9roxBWxcs/UcyJHvbt-WI/AAAAAAAAACWU/Levs6BAMZGo/s320/P1130458.JPG>

## CALOR CON PLACA.

Es muy similar al método por calor directo, salvo que en este el calor es transmitido a una superficie metálica, la que transfiere temperatura de forma constante y homogénea a la madera.

Es habitualmente utilizado en violería.

### VENTAJAS

- Sencillez.
- No requiere secado.

### DESVENTAJAS

- Aplicable únicamente a láminas de madera.



Izq.: <http://luthier.ukulele.de/Making/Side/BendingIron.jpg>

Der.: <http://pics.livejournal.com/emkey/pic/0009h172/s640x480>

## VAPORIZADO A ALTA PRESIÓN.

Las maderas son vaporizadas a alta temperatura en autoclaves con presión de entre 3 y 7 atmósferas.

Según PECK (1957) y ARAYA (2005), el vaporizado a alta presión no produce mejoras cualitativas respecto el mismo proceso a baja presión.

### VENTAJAS

- Reducción de tiempo.

### DESVENTAJAS

- Altos costos.
- En algunas especies, probabilidad de manchar la madera.
- Eventuales roturas de piezas durante el curvado.



Izq. [http://maquinaria-madera.com/228-thickbox\\_default/autoclaves-y-caldera-para-madera.jpg](http://maquinaria-madera.com/228-thickbox_default/autoclaves-y-caldera-para-madera.jpg)

Der. <http://www.fimaco.com.ar/productos/autoclaves/a04/a04-im05.jpg>

## VAPORIZADO A BAJA PRESIÓN.

Como en el proceso anterior, la madera es vaporizada en una cámara pero a una atmósfera de presión. Puede realizarse de forma artesanal o industrial. De las diferentes tecnologías empleadas actualmente en la industria, el curvado de madera sólida plastificada con vapor a baja presión es un proceso económico y eficiente a escala semi-industrial (KATSURAGI; 2005. Citado por OLGUÍN y SOTOMAYOR, 2013).

### VENTAJAS

- Sencillez.
- Económico.

### DESVENTAJAS

- Proceso más lento que a alta presión.
- Eventuales roturas de piezas durante el curvado.



Izq. <https://canoemuseum.files.wordpress.com/2012/08/dsc08630.jpg?w=620>

Cent. y der.: fotografías del autor.

Escala de calificación de probetas.



FICHA DE REGISTRO DE **TABLAS**

CÓDIGO				
Nº DE TABLA (1..N)	GÉNERO P (Pino) E (Euca)	ESPECIE Taeda / Elliotts Grandis	BARRACA	CFS (Sí / No)

CÓDIGO				
Nº DE TABLA (1..N)	GÉNERO P (Pino) E (Euca)	ESPECIE Taeda / Elliotts Grandis	BARRACA	CFS (Sí / No)

CÓDIGO				
Nº DE TABLA (1..N)	GÉNERO P (Pino) E (Euca)	ESPECIE Taeda / Elliotts Grandis	BARRACA	CFS (Sí / No)

CÓDIGO				
Nº DE TABLA (1..N)	GÉNERO P (Pino) E (Euca)	ESPECIE Taeda / Elliotts Grandis	BARRACA	CFS (Sí / No)

CÓDIGO				
Nº DE TABLA (1..N)	GÉNERO P (Pino) E (Euca)	ESPECIE Taeda / Elliotts Grandis	BARRACA	CFS (Sí / No)

CÓDIGO				
Nº DE TABLA (1..N)	GÉNERO P (Pino) E (Euca)	ESPECIE Taeda / Elliotts Grandis	BARRACA	CFS (Sí / No)

FICHA DE REGISTRO DE ENSAYOS

CÓDIGO			
Nº DE TABLA (TBLN)	RADIO (cm)	T (90 / 100PC)	ORDEN (1...n)
TIPO DE DEFECTO			
CALIFICACIÓN			
0 DEFICIENTE    1 REGULAR    2 BUENA    3 EXCELENTE			

	(PC)
	(N)
	(cm)
1	
2	
3	
4	

		(%)
	(%)	
	(PC)	
	(%)	
	(N)	
	(%)	
	(N)	

FICHA DE REGISTRO DE ENSAYOS

CÓDIGO			
Nº DE TABLA (TBLN)	RADIO (cm)	T (90 / 100PC)	ORDEN (1...n)
TIPO DE DEFECTO			
CALIFICACIÓN			
0 DEFICIENTE    1 REGULAR    2 BUENA    3 EXCELENTE			

	(PC)
	(N)
	(cm)
1	
2	
3	
4	

		(%)
	(%)	
	(PC)	
	(%)	
	(N)	
	(%)	
	(N)	

FICHA DE REGISTRO DE ENSAYOS

CÓDIGO			
Nº DE TABLA (TBLN)	RADIO (cm)	T (90 / 100PC)	ORDEN (1...n)
TIPO DE DEFECTO			
CALIFICACIÓN			
0 DEFICIENTE    1 REGULAR    2 BUENA    3 EXCELENTE			

	(PC)
	(N)
	(cm)
1	
2	
3	
4	

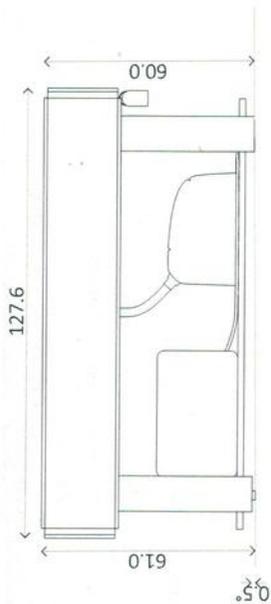
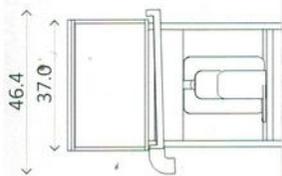
		(%)
	(%)	
	(PC)	
	(%)	
	(N)	
	(%)	
	(N)	

FICHA DE REGISTRO DE ENSAYOS

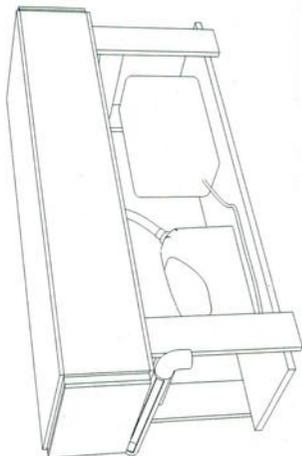
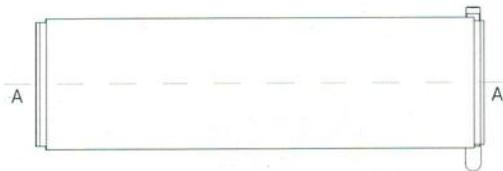
CÓDIGO			
Nº DE TABLA (TBLN)	RADIO (cm)	T (90 / 100PC)	ORDEN (1...n)
TIPO DE DEFECTO			
CALIFICACIÓN			
0 DEFICIENTE    1 REGULAR    2 BUENA    3 EXCELENTE			

	(PC)
	(N)
	(cm)
1	
2	
3	
4	

		(%)
	(%)	
	(PC)	
	(%)	
	(N)	
	(%)	
	(N)	



Inclinación de 0.5° - 1° para desagüe



CÁMARA DE VAPORIZADO

Hoja 1

26/11/2014

Medidas en cm  
Escala 1:15

Vistas generales.

Sebastian Cervetto  
EUCD - Fag - UDELAR

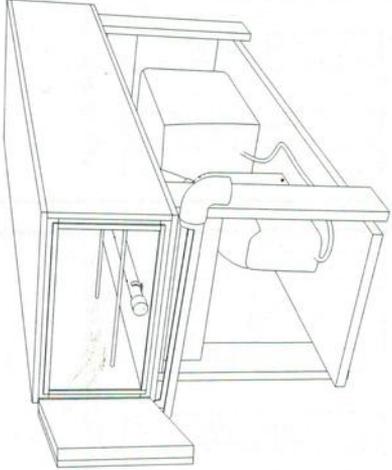
Tesis: Agregado de valor a madera sólida de producción nacional mediante curvado por plastificado higrotérmico

Manta de polietileno para aislación 10mm

Estructura en multilaminado fenólico plastificado 18mm

Varillas de aluminio para soporte de probetas

Perforación para inserción de termocupla



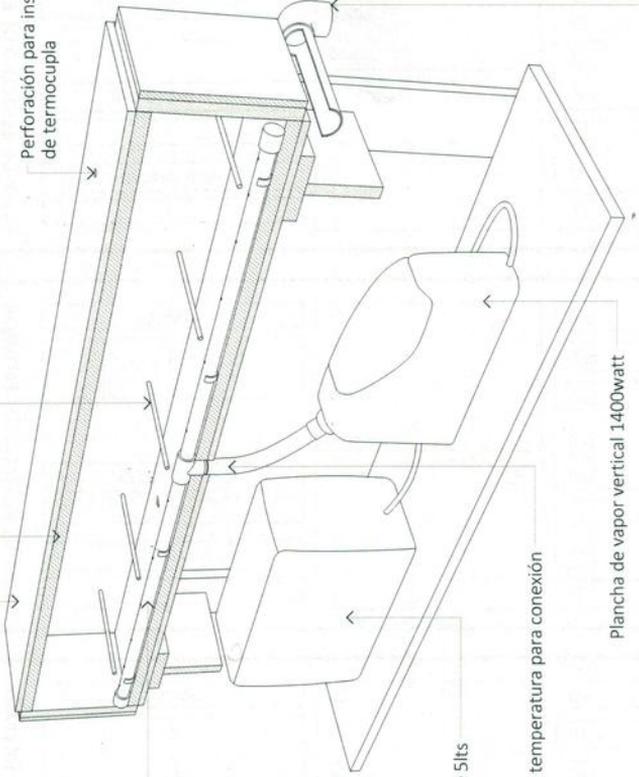
Caño difusor de vapor de acero negro

Depósito de agua de 5lts

Caño flexible de alta temperatura para conexión

Plancha de vapor vertical 1400watt

Caño de PVC para desagüe



CÁMARA DE VAPORIZADO

Especificaciones generales.  
Corte:

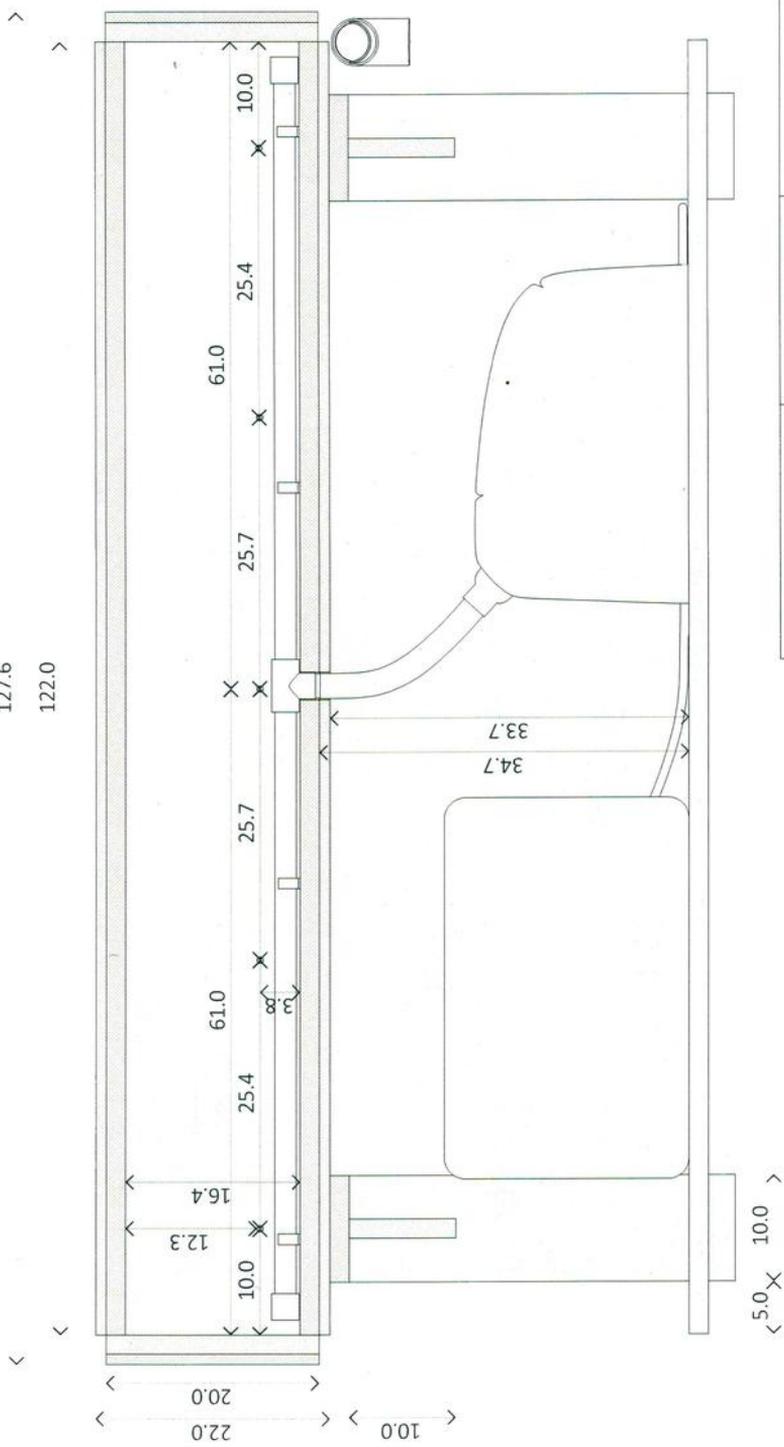
26/11/2014	Hoja 3
Medidas en cm	Escala --

Sebastián Cervetto  
EUCO - FARA - UDELAR

Tesis: Agregado de valor a madera sólida de producción nacional mediante curvado por plastificado higrotérmico

127.6

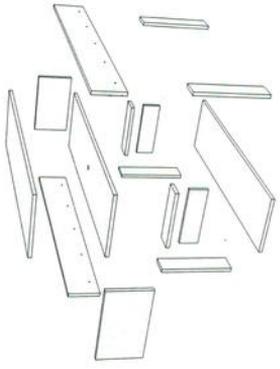
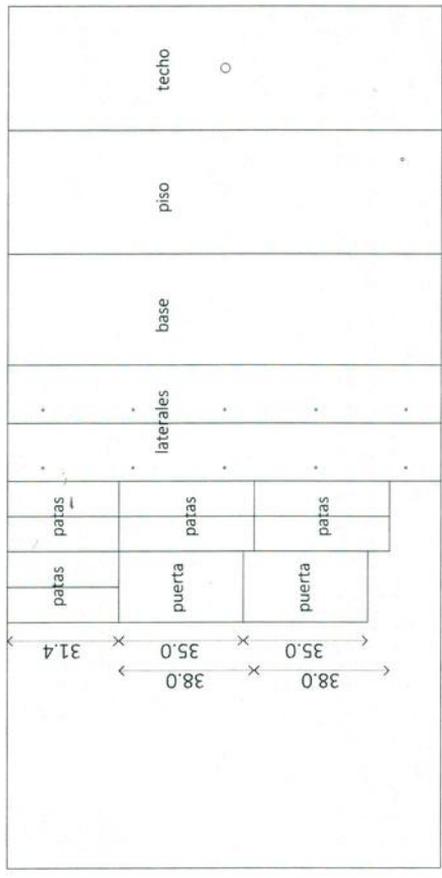
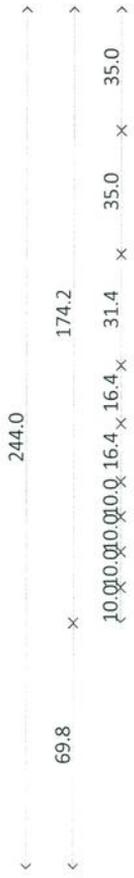
122.0



CÁMARA DE VAPORIZADO		Corte AA	
26/11/2014	Hoja 2		
Medidas en cm		Escala 1-5	

Sebastián Cervetto  
EUCO - Fag - UDELAR

Tesis: Agregado de valor a madera sólida de producción nacional mediante curvado por plastificado higrotérmico



<b>CÁMARA DE VAPORIZADO</b>	
26/11/2014	Hoja 4
Medidas en cm	
Escala 1:15	

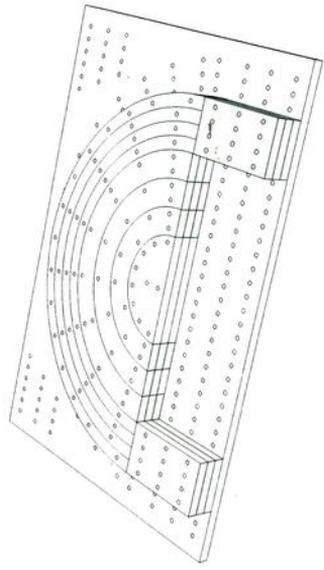
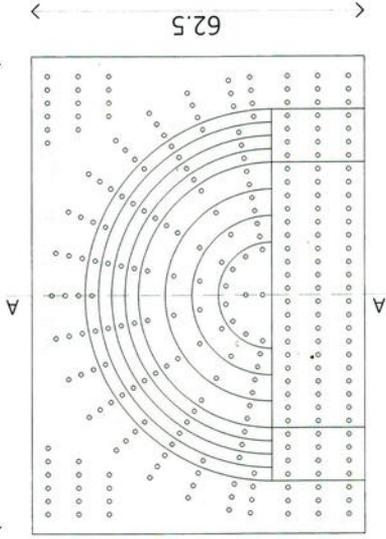
Aprovechamiento de material:  
 Placa de multilaminado fenólico 18mm

**Sebastián Cervetto**  
 EUCD - FARE - UDELAR

Tesis: Agregado de valor a madera sólida de producción nacional mediante curvado por plastificado higrotérmico



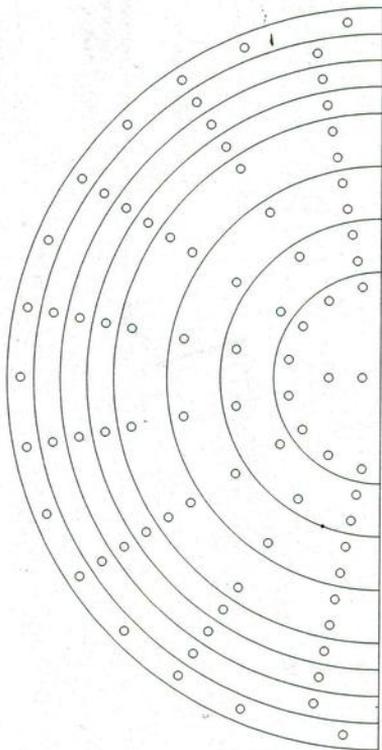
90.0



Material: multilaminado fenólico plastificado 18mm  
 Perforaciones en aros: diámetro 8.0 mm  
 Perforaciones en base: diámetro 8.2mm

SISTEMA FLEXOR		Medida de radios variables. Vistas generales.	
26/11/2014	Hoja 1		
Medidas en cm	Escala 1:10		
		Sebastián Cervetto EUCD - Fag - UDELAR	

Tesis: Agregado de valor a madera sólida de producción nacional mediante curvado por plastificado higroérmico.

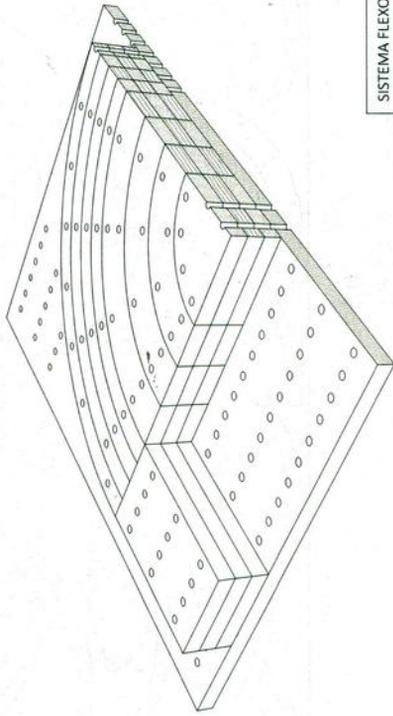
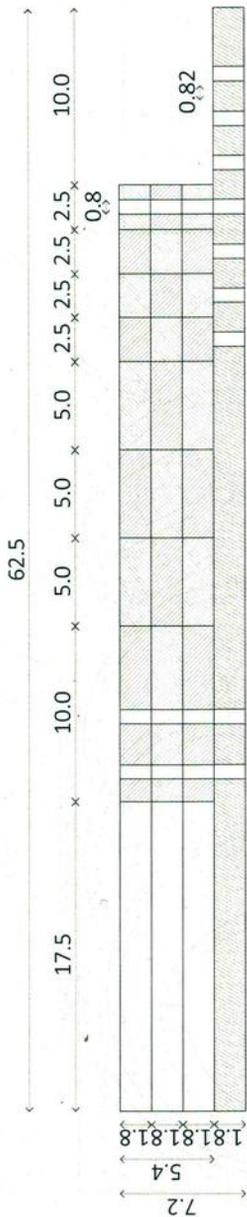


arco (D, cm)	perímetro exterior (cm)
20	31.5
30	47.1
40	62.8
50	78.5
55	86.4
60	94.3
65	102.1
70	110

SISTEMA FLEXOR		Aros y pieza de apoyo	
26/17/2014		Hoja 3	
Medidas en cm		Escala 1:5	

Sebastián Cervetto  
EUCD - Farg - UDELAR

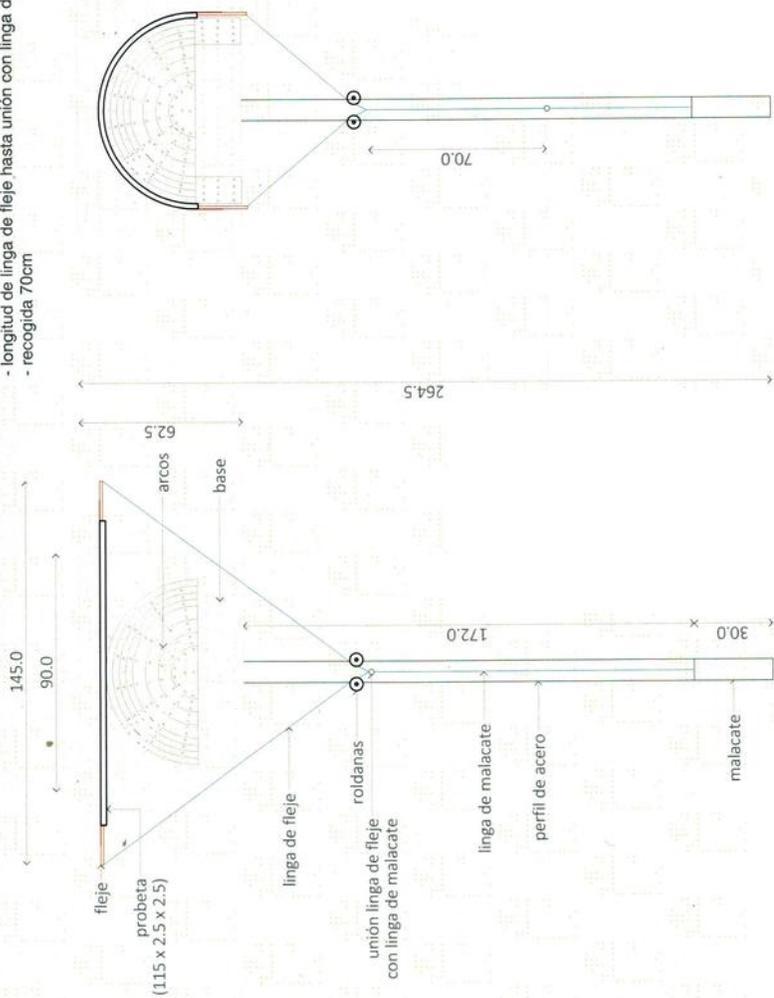
Tesis: Agregado de valor a madera sólida de producción nacional mediante curvado por plastificado higrotérmico



SISTEMA FLEXOR		Corte AA		Sebastián Cervetto	
26/11/2014		Hoja 2		EUCD - Farq - UDELAR	
Medidas en cm		Escala 1:3			
Tesis: Agregado de valor a madera sólida de producción nacional mediante curvado por plastificado higrotérmico					



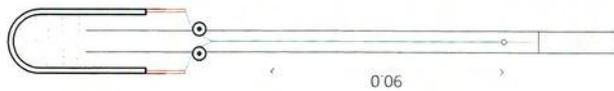
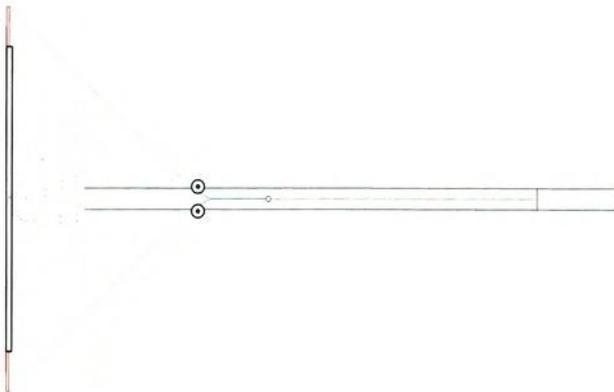
Para radio de 35cm:  
 - longitud de linga de fleije hasta unión con linga de malacate: 123cm  
 - recogida 70cm



<b>SISTEMA FLEXOR</b>		Sistema de flexión. Dimensiones y referencias generales.	<b>Sebastián Cervetto</b> EUCD - Fiq - UDELAR
Hoja 5			
Medidas en cm		Escala 1:20	
Tesis: Agregado de valor a madera sólida de producción nacional mediante curvado por plastificado higrotermico			

Para radio de 10cm:

- longitud de linga de fleije hasta unión con linga de malacate: 123cm
- recogida 90 cm



SISTEMA FLEXOR

26/11/2014

Medidas en cm

Hoja 6

Escala 1:20

Sistema de flexión  
Dimensiones y referencias generales

Sebastián Cervetto  
EUCC - Farq - UDELAR

Tesis: Agregado de valor a madera sólida de producción nacional mediante curvado por plastificado higrotérmico

## Análisis de datos del sistema.

		CÁMARA							PROBETA			
	T ambiente	hora inicial	hora final	hi - hf	T interior	T exterior	Ta - Tex	hora inicio	hora final	hi - hf	T	
1	21/10/14	22,5			99,6	26,7	4,2					
2	28/10/14	25,00	14:11	15:33	1:22	99,1	30,2	5,20				
3	29/10/14	22,90	13:34	14:53	1:19	98,2	26,5	3,60	15:25	16:03	0:38	88,3
4	4/11/14	19,30	15:44	16:57	1:13	99,1	26,4	7,10				
5	5/11/14	23,90	13:48	14:58	1:10	98,9	30,8	6,90				
6	13/11/14	21,54	9:58	11:02	1:04	99,1			11:02	11:42	0:40	100,3
7	19/11/14	25,80	14:15	15:19	1:04	99			15:19	16:00	0:41	100,8
Promedio				1:12	99,0		5,4		0:39	96,5		
(T en °C)												

Tabla de radios límites de curvatura.

Para madera vaporizada y secada al aire libre. 25.4mm de espesor (ARAYA; 2005. De: Stevens; 1972).

<b>Especie</b>	<b>Especie</b>	<b>Radio (mm)</b>	<b>Radio (mm)</b>
<b>Nombre Comercial</b>	<b>Nombre botánico</b>	<b>Con banda de apoyo</b>	<b>Sin banda</b>
Haya danesa	<i>Fagus sylvatica</i>	43	370
Haya rumana	<i>Fagus sylvatica</i>	41	410
Haya inglesa	<i>Fagus sylvatica</i>	38	330
Eucalipto pilularis	<i>Eucalyptus pilularis</i>	610	1220
Castaño	<i>Castanea sativa</i>	150	380
Laurelia	<i>Laurelia aromática</i>	430	500
Coigüe	<i>Nothofagus dombeyi</i>	250	420
Danta	<i>Nesogordonia papaverifera</i>	360	760
Olmo rojo americano	<i>Ulmus thomassi</i>	38	360
Olmo blanco americano	<i>Ulmus americana</i>	43	340
Abeto blanco americano	<i>Abies grandis</i>	910	910
Bossé blanco	<i>Guarea thompsonii</i>	360	910
Bossé blanco	<i>Guarea cedrata</i>	190	510
Roble blanco americano	<i>Quercus spp.</i>	13	330
Raulí	<i>Nothofagus alpina</i>	420	420

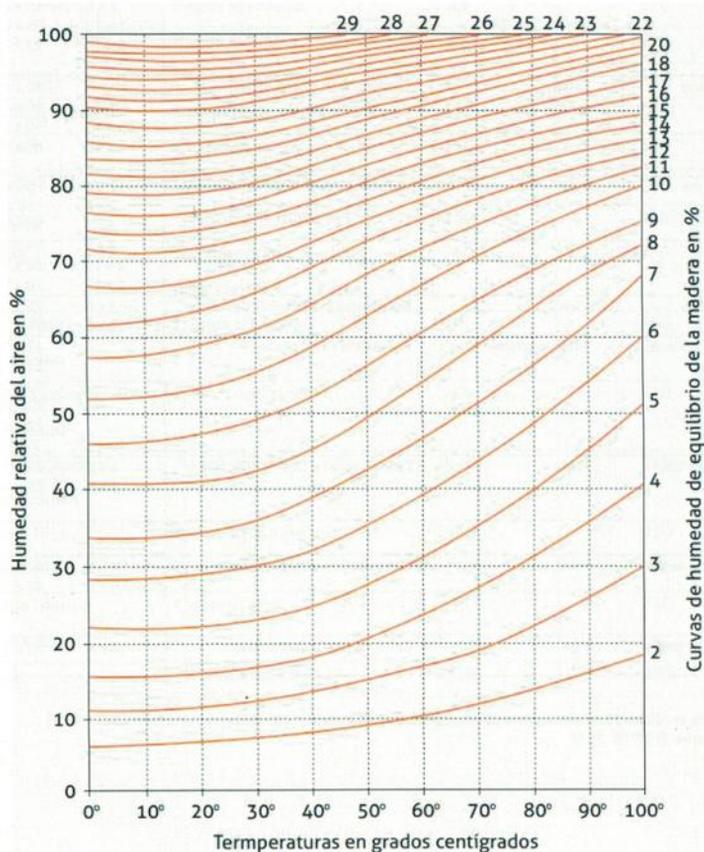
Lista simplificada de piezas de sección rectangular de maderas fabricadas en Uruguay (DIESTE. 2012).

Especie	Producto	Uso	Nominales	Netas	Largo (m)
			E x A (")	E x A (mm)	
Pino	Tabla	Moldes de mampostería	1 x 6	20 x 150	3,30
Pino	Tabla machihembrada	Revestimiento		12 x 100	2,40
				12 x 125	3,30
				12 x 150	
			1 x 6	23 x 135	2,40
					3,60
Pino	Tabla	Construcción y carpintería	1 x 6	25 x 150	2,40
			1 x 8	25 x 200	3,00
			1 x 10	25 x 250	3,30
			1 x 12	25 x 300	3,60
					4,50
Pino	Tabla	Construcción y carpintería	1½ x 6	40 x 150	2,40
			1½ x 8	40 x 200	3,00
			1½ x 10	40 x 250	3,30
			1½ x 12	40 x 300	3,60
					4,50
Pino	Viga	Construcción y carpintería	2 x 3	50 x 75	3,30
			2 x 4	50 x 95	4,20
			2 x 6	50 x 150	4,50
			2 x 8	50 x 200	
			2 x 10	50 x 250	
			2 x 12	50 x 300	
Pino	Viga	Construcción y carpintería	3 x 6	75 x 150	3,30
			3 x 8	75 x 200	4,50
<i>E. grandis</i>	Tabla machihembrada	Revestimiento y pisos		12 x 100	2,40
				12 x 125	3,30
				12 x 150	
				22 x 100	
				22 x 150	
			22x 150		
<i>E. grandis</i>	Tabla	Construcción y carpintería	1 x 6	25 x 150	2,10
			1 x 8	25 x 200	2,40
					3,30
					4,30
				4,50	
<i>E. grandis</i>	Tabla	Construcción y carpintería	1½ x 6	40 x 150	2,10
			1½ x 8	40 x 200	2,40
					3,30
					4,50
<i>E. grandis</i>	Viga	Construcción y carpintería	2 x 8	50 x 200	4,30
					4,50

Lista simplificada de piezas de sección rectangular de maderas fabricadas en Uruguay.  
Fuente: DIESTE. 2012

### Curvas de equilibrio higroscópico de la madera.

Kollmann (1959) comprobó que la humedad de equilibrio higroscópico es casi constante para todas las especies de maderas y desarrolló el gráfico adjunto, representando los valores medios de contenido de humedad de la madera para una humedad relativa del aire en % y una temperatura ambiente determinada (CALDERÓN).



Ficha de registro de ensayos 1/3

nº probeta	fecha del ensayo	sección (mm)	anillos f(moide)	código								ambiente		ensayos		
				tabla	género	especie	barraca	secado	radio	T (°C)	orden	T (°C)	H (%)	H0 (%)	t (vaporizado)	H1 (%)
1	20 ene.	22		18	Euca	Grandis	El Puntal	Natural	20	100	1	24,4	69	12		13,8
2	20 ene.	22		20	Euca	Grandis	El Puntal	Natural	20	100	2	24,3		12,6	0,45	15,4
3	21 ene.	22		21	Euca	Grandis	Gabyccar	Artificial	20	100	1	22,7	54	22,6	0,45	14,8
4	21 ene.	22		18	Euca	Grandis	El Puntal	Natural	20	100	2	23,0		27,8	0,45	18,5
5	21 ene.	22		21	Euca	Grandis	Gabyccar	Artificial	20	100	3	23,0		9,3	0,45	13,4
6	22 ene.	22	diagonal	2	Pino	Elliott	Arazatí	Artificial	20	100	1	24,3	58	10,4	0,45	18,1
7	22 ene.	22	diagonal	12	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	20	100	2	24,8	55	11,3	0,45	14
8	23 ene.	22	perpendicular	7	Pino	Elliott	LATU	Artificial	20	100	1	24,8	61	11	0,40	14,1
9	23 ene.	22	diagonal	6	Pino	Elliott	Arazatí	Artificial	20	100	2	25,0	61	10,9	1,00	16,5
10	23 ene.	22	perpendicular	7	Pino	Elliott	LATU	Artificial	20	100	3	27,0	60	10,9	0,45	13,2
11	26 ene.	22	diagonal	1	Pino	Elliott	Arazatí	Artificial	25	100	1	27,1	74	12,8	0,45	15,3
12	26 ene.	22	perpendicular	8	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	25	100	2	28,3	69	12,6	0,45	17,7
13	26 ene.	22	paralelo	7	Pino	Elliott	LATU	Artificial	25	100	3	29,0	68	10,3	0,45	14,4
14	27 ene.	22	paralelo	6	Pino	Elliott	Arazatí	Artificial	25	100	1	28,0	65		0,45	15,8
15	27 ene.	22	perpendicular	9	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	25	100	2	29,3	64	14,7	0,45	15,6
16	27 ene.	22	paralelo	2	Pino	Elliott	Arazatí	Artificial	25	100	3	29,8	63	11	0,45	13,7
17	28 ene.	22	paralelo	10	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	25	90	1	27,0	68	11	0,45	13,7
18	28 ene.	22	diagonal	4	Pino	Elliott	Arazatí	Artificial	25	90	2			10,5	0,45	12,8
19	28 ene.	22	perpendicular	8	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	30	100	1	27,1	69	10,7	0,45	13,6
20	29 ene.	22	paralelo	12	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	25	100	1	23,9	59	11,8	0,45	14,5
21	30 ene.	22	diagonal	11	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	25	100	1	26,3	51	10,4	0,45	12,7
25	3 feb.	25	perpendicular	23	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	1	26,2	68	11,8	#REF!	14,7
26	3 feb.	25	diagonal	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	2	27,0	67	11,5	#REF!	12,5
27	3 feb.	25	paralelo	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	3	27,5	60	11,4	#REF!	14,7
28	4 feb.	25	paralelo	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	1	26,9	73	12,1	#REF!	14,9
30	4 feb.	25	diagonal	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	3	28,2	65	11,6	#REF!	12,6
31	4 feb.	25	paralelo	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	4	28,0	66	12,2	#REF!	13,2
33	4 feb.	25	paralelo	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	25	100	5	28,2	66	11,8	#REF!	
34	5 feb.	25	diagonal	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	1	28,2	59	11,6	#REF!	12,4
35	9 feb.	25	diagonal	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	1	28,0	60	11,4	0,50	12,8
36	9 feb.	25	diagonal	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	1	28,0	60	11	0,55	12,7
38	13 feb.	25	diagonal	23	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	1	26,3	50	9,4	#REF!	11,9
39	13 feb.	25	perpendicular	23	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	20	100	1	27,3	48	9,2	1,06	13,2
40	18 feb.	25	paralelo	23	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	25	100	1	27,6	58	10,1	#REF!	
41	19 feb.	30	diagonal		Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	25	100	1	25,5	65	10,8	1,00	13,3
42	20 feb.	30	diagonal		Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	25	100	2	25,5	65	10,6	#REF!	13,7
43	2 mar.	20		24	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	30	100	1	26,7	68	29,5	#REF!	
44	2 mar.	20		24	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	30	100	2	26,7	68	28,1	0,40	25,3
45	6 mar.	20	diagonal	24	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	40	100	1	27,1	67	13,6	0,40	14,1
46	6 mar.	20	diagonal	24	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	45	100	2	27,1	67	13,1	0,40	
47	9 mar.	20	diagonal	24	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	45	100	1	26,9	74	14,5	0,40	15,6
48	9 mar.	25	diagonal	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	45	100	2	26,9	74	11,4	0,50	12,9
49	11 mar.	20	diagonal	24	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	45	100	1	26,6	70	14,2	#REF!	15,9
50	11 mar.	20	diagonal	24	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	45	100	2	26,6	70	15	0,50	16,7
51	11 mar.	20	paralelo	24	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	45	100	3	26,6	70	13,7	0,40	
52	11 mar.	20	diagonal	24	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	45	100	3	26,6	70	13,7	0,40	
53	16 mar.	22	paralelo	21	Euca	Grandis	Gabyccar	Artificial	45	100	1	26,1	65	10,3	0,45	12,4
54	28 mar.	22	diagonal	11	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	54	100	1	22,0	66	10,8	0,44	
57	28 mar.	22	paralelo	7	Pino	Elliott	LATU	Artificial	54	100	4	22,0	66	9,3	0,44	12,1
58	28 mar.	25	diagonal	23	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	54	100	5	22,0	66	10,8	0,50	
59	28 mar.	22	paralelo	21	Euca	Grandis	Gabyccar	Artificial	54	100	6	22,0	66	10,6	0,44	12,9
60	28 mar.	22	diagonal	21	Euca	Grandis	Gabyccar	Artificial	54	100	7	22,0	66	10,6	0,44	14,1
61	28 mar.	22	paralelo	21	Euca	Grandis	Gabyccar	Artificial	54	100	8	22,0	66	9,9	#REF!	
62	28 mar.	22	paralelo	21	Euca	Grandis	Gabyccar	Artificial	54	100	9	22,0	66	9,8	#REF!	13,5
63	28 mar.	22	paralelo	21	Euca	Grandis	Gabyccar	Artificial	54	100	10	22,0	66	9,8	#REF!	14,6
64	31 mar.	25	diagonal	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	54	100	1	23,4	72	11,9	0,50	14,1
65	31 mar.	25	diagonal	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	54	100	2	23,4	72	11,3	0,50	12,6
67	31 mar.	25	paralelo	22	Pino	Elliott	PlacaMadera	Natural	54	100	4	23,4	72	11,5	0,50	12,9
68	31 mar.	19	diagonal	25	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	54	100	5	23,4	72	45,2	0,38	39,1
70	31 mar.	19	paralelo	25	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	54	100	7	23,4	72	49,4	0,38	36,3
71	31 mar.	19	diagonal	25	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	54	100	8	23,4	72	22	0,38	29,8
72	31 mar.	19	paralelo	25	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	54	100	9	23,4	72	33,4	0,38	28,3
73	31 mar.	19	diagonal	25	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	45	100	10	23,4	72	25,5	0,38	24,4
75	31 mar.	19	diagonal	25	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	45	100	12	23,4	72	28,2	0,38	31,8
76	31 mar.	19	diagonal	25	Pino	Elliott	El Puntal	Natural	45	100	13	23,4	72	29,5	0,38	32,4

Ficha de registro de ensayos 2/3

nº probeta	memoria elástica		defecto				calificación
	fecha	apertura (cm)	aplastamiento	pliegue transv	rotura	otro	
1							0 deficiente
2							0 deficiente
3							0 deficiente
4			aplastamiento	pliegue transv		astillado	0 deficiente
5			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
6			aplastamiento	pliegue transv	rotura	astillado	0 deficiente
7			aplastamiento	pliegue transv	rotura		1 regular
8			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
9			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
10			aplastamiento	pliegue transv		astillado	0 deficiente
11			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
12			aplastamiento	pliegue transv		astillado	0 deficiente
13	3 abr. 59.2		aplastamiento	pliegue transv			2 buena
14			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
15			aplastamiento	pliegue transv		torsión	0 deficiente
16			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
17			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
18			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
19			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
20			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
21			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
25	3 abr. 46.1		aplastamiento	pliegue transv			2 buena
26	3 abr. 46.5		aplastamiento	pliegue transv			2 buena
27			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
28			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
30			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
31			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
33			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
34	3 abr. 45.4		aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
35			aplastamiento	pliegue transv			3 excelente
36			aplastamiento	pliegue transv			2 buena
38			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
39			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
40			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
41			aplastamiento	pliegue transv	rotura		0 deficiente
42			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
43			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
44			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
45	3 abr. 89.8		aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
46	3 abr.	91	aplastamiento	pliegue transv			3 excelente
47			aplastamiento	pliegue transv			2 buena
48			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
49			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
50			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
51			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
52			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
53			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
54			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
57	3 abr. 97.4		aplastamiento	pliegue transv			3 excelente
58			aplastamiento	pliegue transv			3 excelente
59			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
60			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
61			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
62			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
63			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
64			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
65			aplastamiento	pliegue transv			1 regular
67			aplastamiento	pliegue transv			0 deficiente
68	3 abr. 95.5		aplastamiento	pliegue transv			3 excelente
70	3 abr. 95.2		aplastamiento	pliegue transv			3 excelente
71	3 abr. 95.3		aplastamiento	pliegue transv			3 excelente
72	3 abr. 95.8		aplastamiento	pliegue transv			3 excelente
73			aplastamiento	pliegue transv			3 excelente
75	3 abr. 88.8		aplastamiento	pliegue transv			3 excelente
76			aplastamiento	pliegue transv			1 regular

n° probeta	comentarios
1	método1 (m1): vaporizado 2/mm espesor con probetas desde el inicio en cámara. Se enfría la cámara para volver a condiciones iniciales
2	(m1)
3	(m1) la probeta estuvo 18.5hs sumergida en agua
4	(m1) la probeta estuvo 22hs sumergida en agua
5	(m1)
6	(m1)
7	(m1)
8	método 2 (m2): entra a cámara a los 45', a t=90° y se vaporiza 2/mm. Se enfría la cámara para volver a condiciones iniciales.
9	(m2) y se vaporiza durante 60'
10	(m2) A PARTIR DE AQUÍ LA TANSIÓN ES APLICADA POR MALACATE, NO POR MASA
11	(m2)
12	(m2)
13	método 3 (m3): cámara precalentada a 98°, vaporizado 2/mm sin volver a condiciones iniciales
14	(m3)
15	(m3)
16	(m3)
17	(m3) cambio en xilohigrómetro a GRUPO E para Pino (se estaba midiendo en GRUPO C). Se encontró la diferencia en el LABIC
18	(m3)
19	(m3) y vaporizado durante 65'
20	(m3)
21	(m3)
25	(m3)
26	(m3)
27	(m3)
28	(m3)
30	(m3)
31	(m3)
33	(m3)
34	(m3)
35	(m3)ingresan 2 probetas en simultáneo a cámara 1/2
36	(m3)ingresan 2 probetas en simultáneo a cámara 2/2
38	(m3)
39	(m3) 3 minutos por mm espesor
40	
41	
42	
43	Tabla 24: para encofrado / olla + plancha
44	
45	
46	
47	
48	
49	80kg de carga
50	80kg de carga
51	
52	
53	
54	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	
67	
68	
70	
71	
72	
73	
75	
76	