



FACULTAD REGIONAL VENADO TUERTO
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

Departamento Ingeniería Civil

Proyecto Final N.º 71

**COMPORTAMIENTO DE UNIONES MÚLTIPLES CON
ELEMENTOS DE FIJACIÓN DE ACERO TIPO CLAVIJA DE
PEQUEÑO DIÁMETRO EN MADERA DE POPULUS DELTOIDES
“AUSTRALIANO 129/60” CULTIVADO EN EL DELTA DEL RÍO
PARANÁ.**

**BEHAVIOR OF MULTIPLE JOINTS WITH STEEL FASTENERS TYPE PLUG
OF LITTLE DIAMETERS IN WOOD OF POPULUS DELTOIDES
“AUSTRALIANO 129/60” CULTIVATED IN THE PARANÁ RIVER DELTA.**

Autor:

LERDA, Facundo Emanuel

Director técnico:

Ing. GUILLAUMET, Alfredo A.

Co-directores:

Ing. FILIPPETTI, María C.

Ing. MANAVELLA, Roberto D.

Director Académico:

Ing. REVELANT, Mauricio

2019

AGRADECIMIENTOS

Desde la idea de concluir mi carrera con una tesis de investigación, fueron surgiendo muchas personas que me acompañaron en este camino de mucho trabajo y descubrimientos.

Recuerdo, hace varios años atrás cuando conocí al Ing. Guillaumet en la cátedra de Estabilidad. Nos comentó sobre los trabajos que desarrollaban en el laboratorio y nos invitó a visitarlo. Poco tiempo después estaba dentro, probando ese nuevo ambiente y haciendo nuevos amigos. No voy a olvidar nunca, mi primer proyecto en la Jornada de Estudiantes Universitarios en Mendoza y algunos otros que continuaron desde allí. Varios años investigando, probando, pasando datos, leyendo comparadores, cebando mates y cientos de cosas más.

En primer lugar, quiero agradecer a Alfredo Guillaumet quien empujó desde el comienzo este proyecto y facilitó todo lo que necesité, a Roberto Manavella por la paciencia para construir los dispositivos de ensayo, a Cecilia Filippetti que sin dudarlo se unió a la causa para ayudar en todo y a mis compañeros y becarios del grupo GIDEC que de una u otra forma estuvieron presentes.

En segundo lugar, agradezco a toda la comunidad educativa de la Facultad Regional Venado Tuerto, porque sin esa estructura, estos proyectos no serían posibles.

En tercer lugar y en lo personal, agradezco a mis padres que estuvieron siempre detrás dando la contención y el calor que necesité, y a mis amigos de la vida que fueron el apoyo de todos los días.

Por último, agradecer al universo por mostrarme lo bueno en lo que es conveniente resguardarse, lo malo de lo que hay que alejarse, los buenos ejemplos a seguir y los no tan afortunados de los que hay que aprender y dejar pasar.

A todos, muchas gracias.

Facundo Emanuel Lerda

RESUMEN.

El objetivo principal de este trabajo es conocer el comportamiento de las uniones múltiples con elementos de fijación de pequeño diámetro realizadas en madera de *Populus deltoides* "Australiano 129/60" cultivada en el delta del Río Paraná y la comparación entre las cargas de rotura determinadas a través del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera INTI-CIRSOC 601 (2016) y las experimentales.

Para ello se diseñó un programa experimental que incluyó el ensayo de 13 uniones paralelas con 6 clavos, 12 paralelas con 9 clavos, 12 perpendiculares con 6 clavos y 12 perpendiculares con 9 clavos. La preparación de las muestras se realizó siguiendo los lineamientos de la norma europea EN 1380 (2009) y la distribución de los elementos de fijación fue cumpliendo las distancias mínimas establecidas en el reglamento INTI-CIRSCO 601 (2016). La aplicación de la carga en los ensayos se llevó a cabo según el esquema especificado en la norma europea EN 26891 (1992). Se obtuvieron valores de resistencia y desplazamientos de las uniones a igual que se determinaron los contenidos de humedad y densidades de la madera utilizada. El programa incluyó el desarrollo de cálculos teóricos mediante las expresiones propuestas por el reglamento para la obtención de las resistencias de rotura de las uniones. Para ello se utilizaron los valores de referencia de diseño propuesto en el Suplemento 4 del reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) y valores experimentales de tensiones de aplastamientos extraídos de una publicación sobre la especie estudiada. Se compararon los resultados teóricos entre sí y la relación de estos con los valores experimentales obtenidos.

Al comparar las resistencias de rotura teóricas con las experimentales se puede observar que estas últimas son mayores. En uniones paralelas la relación es de 1,93 mientras que para uniones perpendiculares es de 1,12. Esto muestra que las expresiones del reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) sobredimensionan las uniones en la dirección paralela a las fibras mientras que es bastante certero para la dirección perpendicular.

Palabras clave: *Populus deltoides*; uniones múltiples; uniones clavadas; capacidad portante; valores de diseño; resistencia al aplastamiento.

ABSTRACT.

The main objective of this work is to know the behavior of the multiple joints with small diameter fasteners made of *Populus deltoides* "Australiano 129/60" wood cultivated in the Paraná River delta and the comparison between the breakage loads determined through the Argentine Regulation of Timber Structures INTI-CIRSOC 601 (2016) and the experimental ones.

For this, an experimental program was designed that included the test of 13 parallel joints with 6 nails, 12 parallel with 9 nails, 12 perpendiculars with 6 nails and 12 perpendiculars with 9 nails. The preparation of the samples was carried out following the guidelines of the European standard EN 1380 (2009) and the distribution of the fasteners was complying with the minimum distances established in the regulation INTI-CIRSCO 601 (2016). The application of the load in the tests was carried out according to the scheme specified in the European standard EN 26891 (1992). Resistance values and displacements of the joints were obtained, as were the moisture contents and densities of the wood used. The program included the development of theoretical calculations by means of the expressions proposed by the regulation for the obtaining the breakage resistances of the joints. For this purpose, the design reference values proposed in Supplement 4 of the regulation INTI-CIRSOC 601 (2016) and experimental values of crushing tensions extracted from a publication on the studied species were used. The theoretical results were compared with each other and their relationship with the experimental values obtained.

When comparing the theoretical and experimental breakage resistances, it can be observed that the latter are greater. In parallel joints the ratio is 1.93 while for perpendicular joints it is 1.12. This shows that the expressions of the regulation INTI-CIRSOC 601 (2016) oversize the joints in the direction parallel to the fibers while it is quite accurate for the perpendicular direction.

Keywords: *Populus deltoides*; multiple joints; nailed joints; loading capacity; design values; crush resistance.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
1.1.1. Objetivos generales.....	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. CLASIFICACIÓN GENERAL.....	4
2.2. ESTRUCTURA ANATÓMICA	6
2.2.1. Macroestructura	6
2.2.2. Microestructura.....	7
2.3. PROPIEDADES DE LA MADERA	10
2.4. CONEXIONES MÚLTIPLES	13
2.4.1. Modelo de Johansen.....	14
3. MATERIAL.....	16
3.1. ÁLAMO COMO ESPECIE EN GENERAL.....	16
3.2. ÁLAMO POPULUS DELTOIDES “AUSTRALIANO 129/60” PARA ENSAYOS EXPERIMENTALES.	20
4. METODOLOGÍA	22
4.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	22
4.1.1. Preparación de los cuerpos de ensayo.....	22
4.1.2. Procedimiento de ensayo.	25
4.1.3. Aplicación de la carga.....	27
4.2. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LAS UNIONES MÚLTIPLES SEGÚN INTI-CIRSOC 601 (2016).	29

5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	32
5.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	32
5.1.1. Resistencias de las uniones.....	32
5.1.2. Determinación del contenido de humedad y de la densidad.....	38
5.2. RESISTENCIA TEÓRICA DE ROTURA DE LAS UNIONES MEDIANTE REGLAMENTO INTI-CIRSOC 601 (2016).....	40
5.3. COMPARACIÓN ENTRE LAS RESISTENCIAS EXPERIMENTALES Y LAS DETERMINADAS MEDIANTE INTI-CIRSOC 601 (2016).....	46
6. CONCLUSIONES.....	50
6.1. EN RELACIÓN A LA RESISTENCIA EXPERIMENTALES DE ROTURA DE LAS UNIONES.....	50
6.2. EN RELACIÓN AL INCREMENTO DE RESISTENCIA EN FUNCIÓN DEL NUMERO DE CLAVOS.....	50
6.3. EN RELACIÓN A LOS VALORES OBTENIDOS MEDIANTE EL REGLAMENTO INTI-CIRSOC 601 (2016).....	51
6.4. EN RELACIÓN A LA COMPARACIÓN DE LOS VALORES TEÓRICOS CON LOS EXPERIMENTALES.....	51
6.5. FUTURAS INVESTIGACIONES.....	52
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
ANEXO I.....	55
ANEXO II.....	59

INTRODUCCIÓN.

Actualmente en el país, debido a la disminución y protección de los bosques nativos, se generó la utilización de madera proveniente de bosques cultivados con especies de rápido crecimiento para uso estructural.

Las plantaciones de Salicáceas ocupan el tercer lugar en extensión en nuestro país. En el Delta del Río Paraná hay una superficie de 83.370 ha. entre álamos y sauces. El álamo o chopo ocupa una extensión de aproximadamente 14.500 ha. y la proximidad de estas plantaciones a las regiones más pobladas del país, hace que aumente su potencial uso como madera estructural.

Actualmente hay diversos estudios y publicaciones sobre el comportamiento del *Populus deltoides* “Australiano 129/60” con valores de flexión y módulos de elasticidad tales como Guillaumet *et al.* (2014), Filippetti *et al.* (2015) y la norma IRAM 9662/4 (2015) y tensiones de aplastamientos en pernos de diferentes diámetros en Manavella *et al.* (2014), pero existen pocos estudios respecto del comportamiento de uniones en madera de álamo. Piter J. C. *et al.* (2014) presenta un estudio sobre uniones con clavos de pequeño diámetro, pero en madera de eucalyptus grandis cultivado en Concordia al igual que el proyecto de tesis doctoral Sosa Zitto (2015) el cual muestra el comportamiento de diferentes tipos de uniones con clavija para la misma especie.

Existen numerosos tipos de uniones capaces de satisfacer el diseño de estructuras en madera. Las conexiones construidas con elementos de fijación tipo clavija constituyen el principal grupo de uniones mecánicas para el uso estructural de la madera. (Racher 1995). Para ello el Reglamento Argentino INTI-CIRSOC 601 (2016) presenta el diseño y cálculo de uniones con las mismas expresiones para todos los materiales y solo modifica las tensiones de aplastamiento para cada uno. Los estudios ya realizados reflejan la incapacidad de la reglamentación para reflejar el comportamiento de las uniones y generan la necesidad de nuevos estudios a los fines de obtener más datos sobre el comportamiento de las especies en sus diferentes zonas de cultivo, así como también de especies aún no estudiadas.

En este trabajo, el estudio de las uniones múltiples con elementos de fijación tipo clavija en pequeños diámetros, permitirá el aporte de nuevos datos técnicos para la especie, permitiendo un uso eficaz de material, impulsando un mayor uso de la madera de reforestación como material estructural, mejorando la rentabilidad forestal y la protección de los bosques nativos.

1.1. OBJETIVOS.

En este trabajo de tesis se ha planteado un objetivo general y objetivos específicos de acuerdo a los conocimientos adquiridos sobre la especie estudiada y la tecnología de la madera en general.

1.1.1. Objetivos generales.

- Conocer el comportamiento de las uniones múltiples con fijaciones de pequeño diámetro.

1.1.2. Objetivos específicos.

- Obtener valores experimentales de resistencia en uniones materializadas con madera de *Populus deltoides* “Australiano 129/60” cultivado en Delta del Río Paraná.
- Identificar si el incremento de la cantidad de clavos de las uniones es proporcional a la resistencia encontrada respetando los espaciamientos mínimos entre fijaciones propuestos por el Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016).
- Determinación de la resistencia de rotura de las uniones de acuerdo a las expresiones del reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016).
- Relacionar los valores teóricos de resistencia de las uniones múltiples con elementos de fijación tipo clavija obtenidos mediante el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera INTI-CIRSOC 601 (2016) y los experimentales.

MARCO TEÓRICO.

La madera es un material muy utilizado en la industria de la construcción, por este motivo y por la singularidad de sus propiedades, requiere un análisis que permita conocer su funcionamiento. A diferencia de otros materiales, este posee características que lo diferencian del resto tales como la anisotropía, la heterogeneidad, y la variabilidad de propiedades entre las especies y sus zonas de cultivo. Es un material natural, con una apariencia porosa fina, compuesto fundamentalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Posee la capacidad de resistir carga y de acuerdo a su especie posee variabilidad en su uso ya sea como secciones vírgenes para piezas estructurales hasta como materia prima de otros materiales.

2.1. CLASIFICACIÓN GENERAL.

Si se tiene en cuenta todas las especies forestales, se pueden diferenciar dos grandes grupos, teniendo en cuenta fundamentalmente sus características anatómicas.

Las gimnospermas constituidas por las coníferas, son árboles con tronco generalmente recto y cónico hasta su ápice como se puede apreciar en la *Figura 2.1*. La madera de estas especies es homogénea y sus células se agrupan en bandas concéntricas en forma de anillo. Estos se presentan en dos tonalidades, dependiendo del estadio del año en cual se generó. Los anillos de color claro compuesto por madera más blanca, generada en la estación primaveral. A esta fase se la conoce más comúnmente como madera temprana y está compuesta por células de pared delgada y mayor lumen para garantizar el transporte de sabia. También se muestran anillos con madera más oscura y dura producida en la etapa de otoño. Se la conoce como madera tardía y se compone de células más pequeñas y con menor cantidad de huecos, ya que generan el sostén del árbol.



Figura 2.1: Aspecto de una gimnosperma. Hoffmeyer (1995)

Las angiospermas, donde se encuentran las latifoliadas se identifican por su copa ramificada bien marcada y por sus troncos que varían sus dimensiones y formas tal como se puede observar en la *Figura 2.2*. Su madera está formada por variedad de células y a diferencia de las coníferas poseen vasos conductores. Si bien en este grupo la forma de crecimiento mediante anillos es la misma, en este caso es dificultosa la diferenciación de sus anillos de crecimiento.

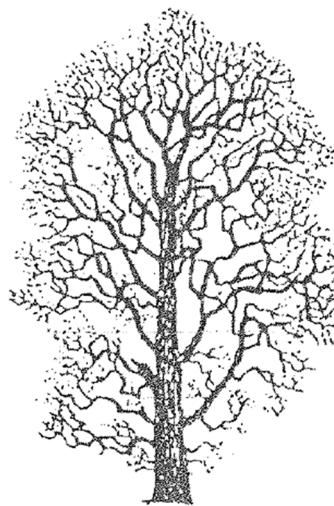


Figura 2.2: Aspecto de una angiosperma. Hoffmeyer (1995)

2.2. ESTRUCTURA ANATÓMICA.

A modo de introducción a las propiedades de la madera se abordará sobre un breve resumen de su anatomía estructural, a nivel macroscópico y microscópico.

2.2.1. Macroestructura.

A este nivel de observación, si realizamos un corte al fuste de un árbol tal como muestra el esquema de la *Figura 2.3*, se pueden identificar cuatro partes fundamentales. La corteza que es la parte más externa de aspecto resquebrajado formada por materia muerta. El liber o floema que es una capa delgada similar a la corteza, que tiene como función la conducción de la sabia elaborada. El cambium casi imperceptible a simple vista y formado con células que garantizan la reproducción. Finalmente, en la parte más interna el Xilema o la madera propiamente dicha, encargada de la conducción de la savia sin elaborar y de darle sostén al árbol. Dentro de la madera y como eje de la sección se encuentra la médula, formada por la madera más vieja del tronco, mucha dureza y de tonalidad oscura.

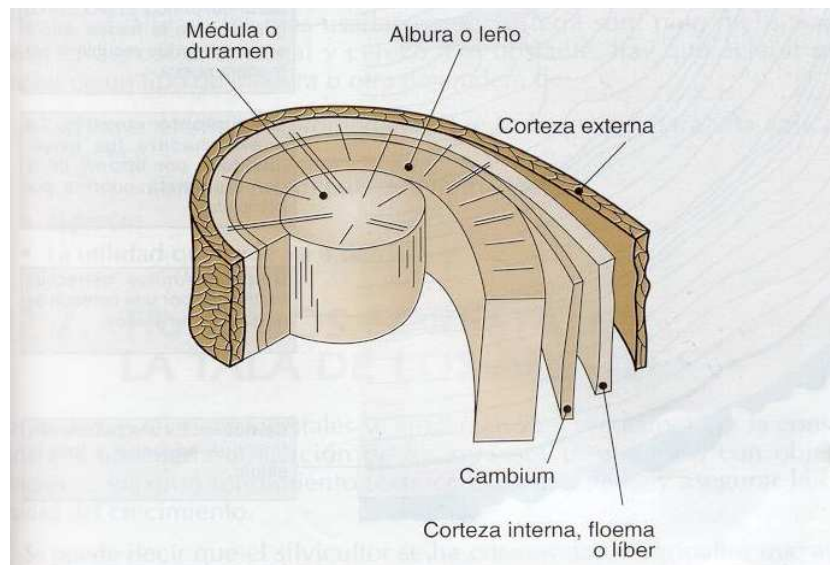


Figura 2.3: Esquema de corte transversal del tronco de un árbol para apreciación de sus partes.

La madera interna del árbol presenta una textura en forma de anillos concéntricos de diferentes tonalidades que se alternan hacia la parte exterior. Esto se debe a que el árbol crece desde adentro hacia afuera generando madera con un tono claro en el periodo de primavera y con un color más oscuro en el período verano-otoño. A esto es a lo que comúnmente se los denomina anillos de crecimiento y su estudio es tema para la caracterización de una especie. La *Figura 2.4* muestra una sección transversal del tronco de manera genérica a los fines de poder apreciar los diferentes anillos de crecimiento. Se numeran los anillos cada dos donde cada uno de ellos está formado por una parte más clara y una parte más oscura.

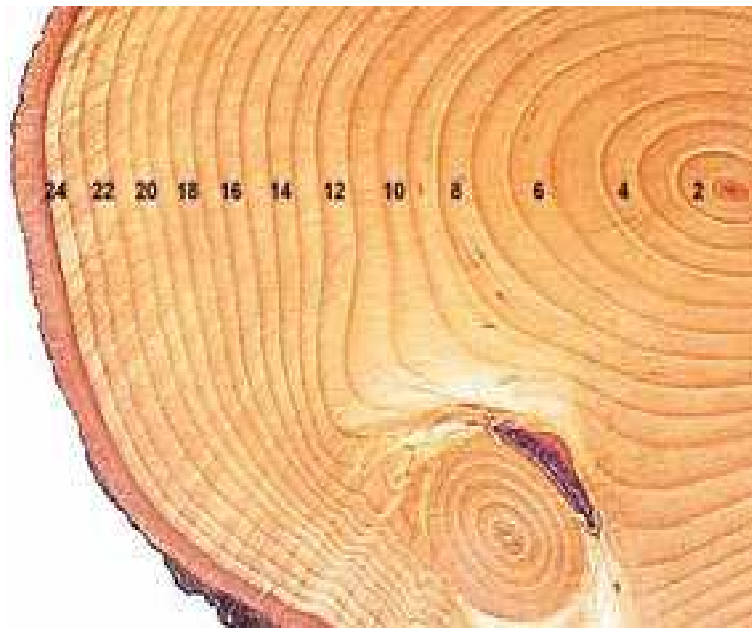


Figura 2.4: Corte transversal del tronco de un árbol donde se indican anillos de crecimiento.

2.2.2. Microestructura.

Si se observa microscópicamente la estructura de la madera se comprueba que está constituida por células de diferentes tipos, en general de forma alargada dispuesta en dirección al eje del árbol. Como se muestra en la *Figura 2.5*, las mismas poseen varias capas de espesores y composición química diferente con una cavidad central denominada lumen. Los dos grandes grupos de especies tales como las coníferas y las frondosas, poseen estructuras que las diferencian con distintos tamaños y tipos de células.

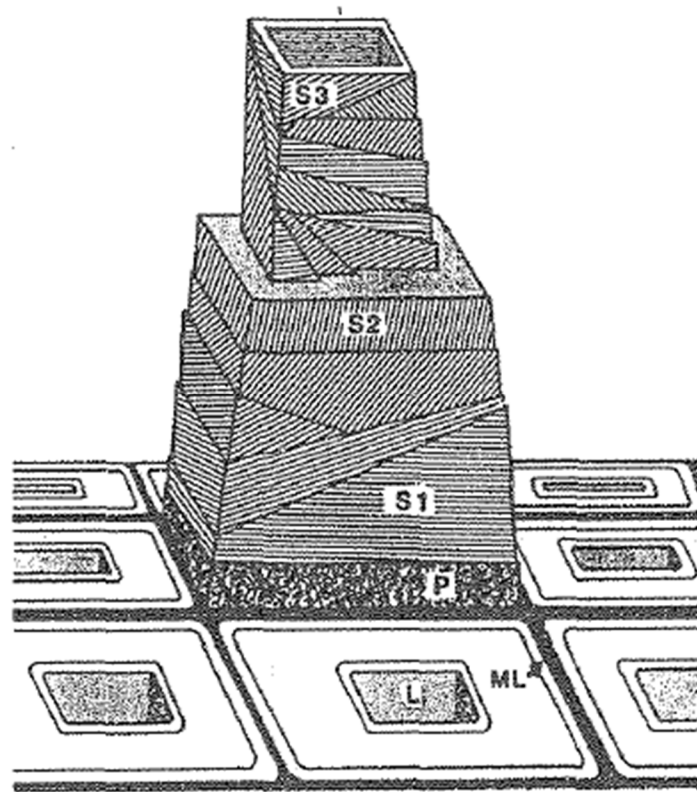


Figura 2.5: Esquema general de la arquitectura de pared de una fibra de madera. Hoffmeyer (1995)

L: lumen celular. ML: laminilla media. P: pared primaria. S1, S2 y S3 capas de la pared secundaria.

Las coníferas están conformadas en un 90% con células de tipo traqueidas dispuestas en el sentido longitudinal del tronco y con la función de conducción y sostén del árbol. El 10% restante lo componen las células parénquimas y las secretoras de los canales resiníferos. Las primeras, de forma rectangular, funcionan como almacenamiento y forman los radios leñosos dispuestos fundamentalmente en forma transversal. Las secretoras, también de forma prismática, segregan resina en los canales resiníferos, que tiene como principal función la de cuidar al árbol de agentes patógenos externos. Ver *Figura 2.6.*

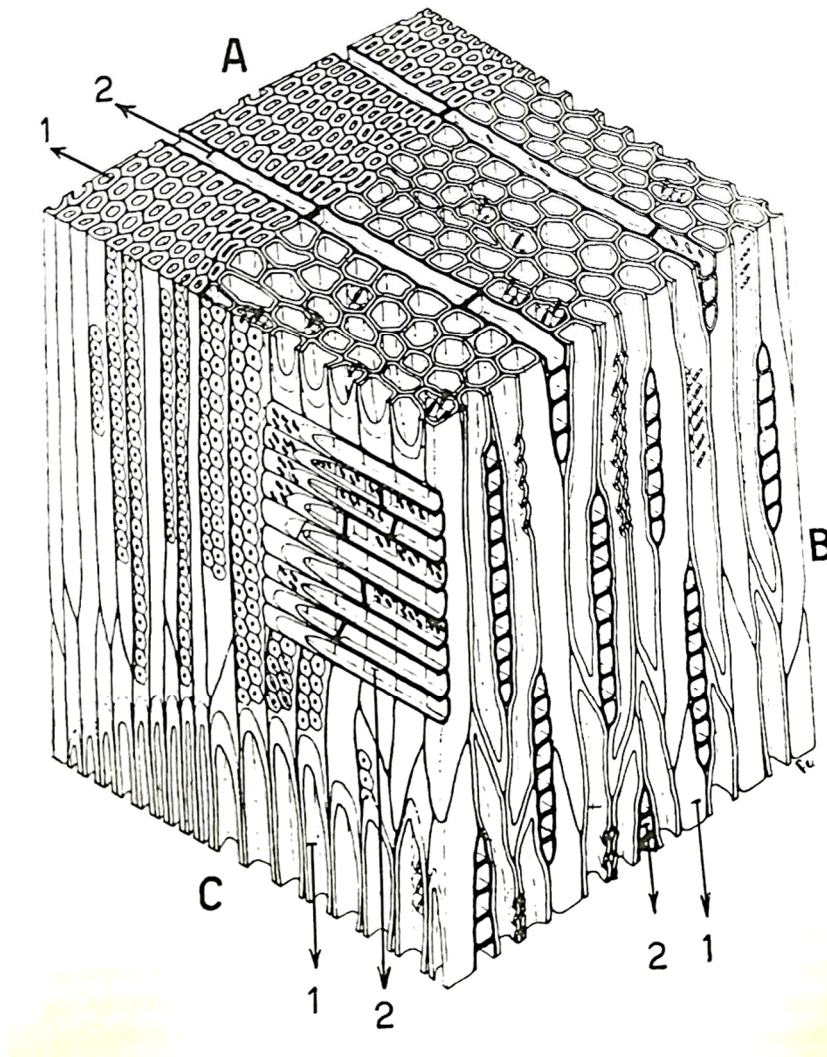


Figura 2.6: Estructura microscópica de una conífera. Tortorelli L. A. (2009)
A: transversal, B: longitudinal tangencial, C: longitudinal radial, 1: traqueidas, 2: radios leñosos

Las latifoliadas poseen una estructura más compleja con mayor variedad de células y de menor tamaño. La mayor parte del tejido está compuesta por las fibras traqueidas y fibro-traqueidas que proporcionan el sostén. Su volumen puede variar entre el 20% y 70% del total. Otra componente son las células tubo o vaso que forman entre el 5 y el 60% del total de la madera y están a cargo de la conducción en el sistema. Finalmente ocupando entre un 6 % y 50% están las parénquimas facilitando el almacenamiento. Ver *Figura 2.7*.

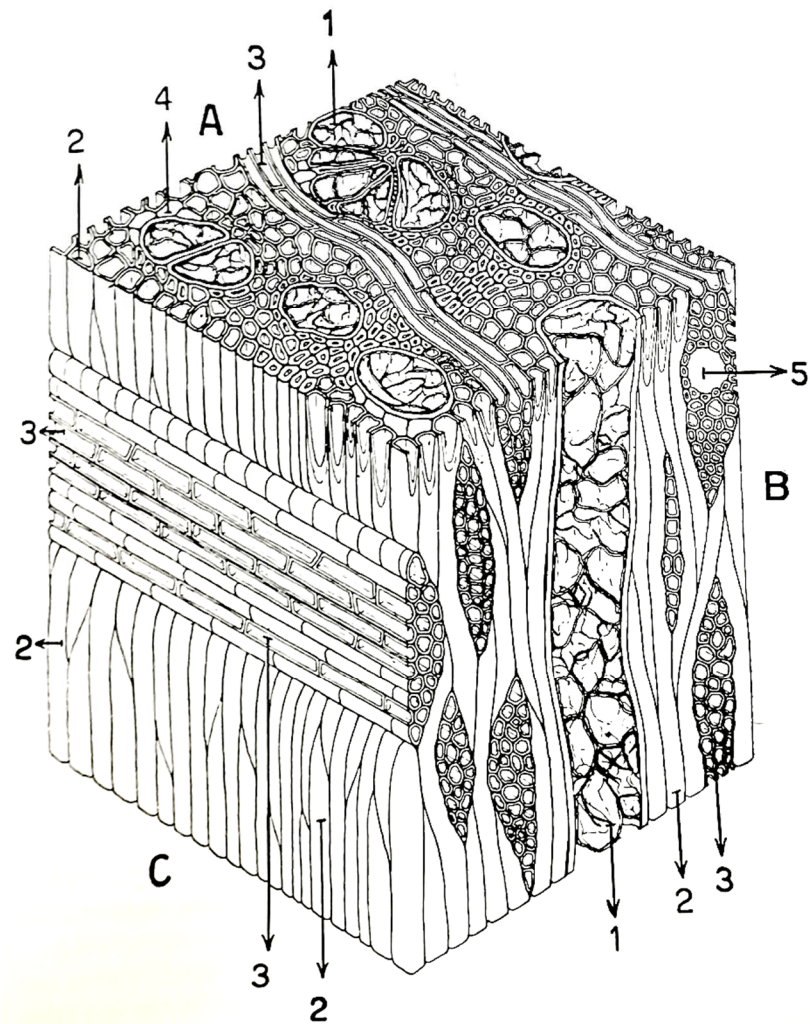


Figura 2.7: Estructura microscópica de una latifoliada. Tortorelli L. A. (2009)

A: transversal, B: longitudinal tangencial, C: longitudinal radial, 1: vasos, 2: traqueidas, 3: radios leñosos, 4: parénquima leñoso, 5: canal resinífero.

2.3. PROPIEDADES DE LA MADERA.

En cuanto a las propiedades se presenta la anisotropía y la higroscopicidad como las más importantes en el desarrollo de este trabajo.

La madera es un material anisótropo, es decir que sus propiedades difieren de acuerdo a la dirección que se considere. Es por ello que es necesario definir distintos planos y direcciones predominantes que permita el estudio.

En la *Figura 2.8* se puede apreciar los tres planos de corte que se proponen, quedando de esta forma determinadas las tres direcciones predominantes de estudio. La dirección axial coincidente con el eje del tronco, la dirección radial perpendicular al eje del árbol y paralela a los radios, y por último la dirección tangencial también perpendicular al eje del árbol, pero tangencial a los anillos de crecimiento.

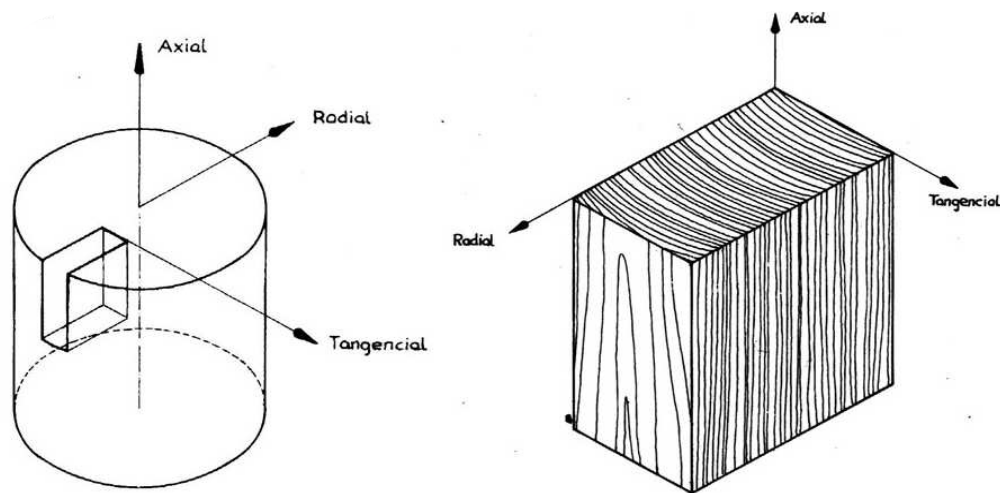


Figura 2.8: Esquema representativo de las direcciones de corte de la madera y orientación de sus fibras.

Como ya se mostró en la *Figura 2.5*, las células poseen pequeños huecos entre las fibrillas y microfibrillas con una tensión capilar capaz de captar el agua del ambiente, así como también la atmósfera, dependiendo de la temperatura, humedad relativa ambiente y la presión atmosférica, puede captar agua desde las paredes de la célula. Este fenómeno es lo que se conoce como higroscopicidad de la madera.

Se puede observar que el comportamiento de la madera está muy influenciado por el contenido de humedad producido por el intercambio con el medio ambiente. El contenido de humedad resulta un factor determinante en su durabilidad, su resistencia, en el peso y en su contracción e hinchamiento por la absorción o merma de agua de sus

células. Un árbol recién cortado puede llegar a tener un contenido de humedad del 80% que luego mediante el intercambio higroscópico con el ambiente comienza a disminuir hasta llegar a un punto de equilibrio denominado HEH o Humedad de Equilibrio Higroscópica. En condiciones climáticas normales (20°C +/- 2°C de temperatura y 65% +/- 5% de humedad relativa del ambiente) la mayoría de las especies obtienen su humedad de equilibrio al 12%.

Una madera aserrada expuesta a condiciones ambientales saturadas, puede aumentar su HEH hasta un 30%, donde el agua ocupa todos los huecos entre las fibras elementales, microfibrillas y las fibras de la pared celular. A este punto se lo conoce como punto de saturación de las fibras o PSF y para la mayoría de las especies se encuentra entre el 25% y 35%. Para que una madera adquiriera una humedad mayor que la correspondiente al PSF, es necesario llenar de agua las cavidades del lumen celular. Dicho proceso se puede llevar a cabo mediante la inmersión de la madera o por medios mecánicos.

La densidad o peso específico es otra de las propiedades que se encuentran muy ligadas al contenido de humedad, ya que sus componentes varían de acuerdo al contenido de agua que presente la madera. A raíz de esto, es necesario ligar el valor de densidad a un determinado contenido porcentual de humedad, debido a que dos especies distintas con la misma humedad pueden contener cantidades diferentes de agua. Se debe a que las maderas pueden tener volúmenes de huecos diferentes. Las maderas ligeras o blandas, poseen una densidad anhidra (sin humedad) mucho más baja que las maderas duras con paredes celulares más grandes y por lo tanto menor cantidad de huecos para contener agua.

Si se habla de la madera como material estructural, se debe hablar de su capacidad mecánica de resistir carga. La misma tiene un comportamiento visco-elástico capaz de retomar su deformación inicial una vez que la fuerza aplicada desaparece, siempre y cuando no se haya superado el límite elástico del material. La deformación adquirida en el período plástico puede ser mucho mayor que la de otros materiales como el acero y el hormigón. Debido a la anisotropía del material, la resistencia alcanza valores diferentes según las direcciones, con una mayor capacidad en el sentido axial o longitudinal respecto del radial

En relación directa con el objetivo de estudio de este trabajo, las propiedades mecánicas de una estructura se encuentran vinculada al desempeño de las conexiones de sus partes, lo cual hace muy importante su estudio y desarrollo. Los esfuerzos cortantes y de tracción que se generan en las uniones pueden definir la capacidad portante del conjunto. El Manual de Aplicación de los Criterios de Diseño del Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) en su capítulo M.8.E presenta problemáticas típicas del diseño de uniones mecánicas con elementos de fijación tipo clavija. Entre ellos se presentan ejemplos de uniones utilizando bulones, uniones con tirafondos y piezas auxiliares de acero y uniones clavadas las cuales son tema central de este estudio.

2.4. CONEXIONES MÚLTIPLES.

Las conexiones múltiples con elementos de fijación tipo clavija (clavos, bulones, pasadores, tirafondos, tornillos, grampas) reviste principal importancia, no solo porque es objeto de estudio de esta investigación sino también porque dicho sistema constituye el principal grupo de conexiones mecánicas estructurales utilizadas (Racher 1995) y en particular para el Reglamento Argentino INTI-CIRSOC 601 (2016).

Las estructuras de madera están compuestas por miembros conectados mediante uniones, que permitan formar un sistema estructural que cumpla con los objetivos dispuestos. Al ser la madera un material anisótropo donde sus propiedades se manifiestan diferentes respecto de la orientación de sus fibras, el estudio de las uniones requiere tener en cuenta variados aspectos para un correcto trabajo mecánico sin llegar a la falla del punto. El colapso de una unión puede generar el colapso parcial o total del sistema estructural. (Argüelles Álvarez *et al.* 2000).

Las uniones con fijaciones tipo clavija, elementalmente se encuentran formadas por elementos atravesados por un vástago que impide su separación. Su comportamiento mecánico está sujeto al número de secciones sometidas a corte, las secciones de los elementos de madera y de las fijaciones, así como también la geometría con la que se disponen las partes. Si bien es posible construir conexiones con más de dos secciones de

corte, los métodos de cálculos adoptados se basan en estudios con una o dos secciones de corte simétrica.

El Reglamento de Estructura de Madera INTI-CIRSOC 601 (2016) adopta para el análisis el modelo desarrollado por Johansen (1949), el cual permite calcular la capacidad portante de las conexiones con elementos de fijación tipo clavija, mediante una serie de expresiones matemáticas para cada modo de rotura propuesto.

2.4.1. Modelo de Johansen.

Johansen propone un modelo que permite obtener los valores de capacidad portante de las uniones múltiples para diferentes formas de falla de acuerdo a la presencia de sucesos tales como el aplastamiento de algunos o todos sus miembros de madera y la formación de rótulas plásticas en los elementos de fijación. En la *Figura 2.9*, se muestran los diferentes modos de falla que clasifica Johansen para las uniones con 2 y 3 elementos conjuntamente con sus respectivos diagramas a los fines de poder apreciar gráficamente las deformaciones y aplastamientos que se producen en cada uno.

En las uniones con dos elementos, los modos de falla “*lm*” y “*ls*” se deben al aplastamiento de la madera en uno u otro elemento contra el elemento de fijación, el cual no gira ni se deforma. En el modo de falla “*ll*”, el aplastamiento de la madera se da en forma simultánea con el giro del elemento de fijación sin deformación. En los modos “*llm*”, “*lls*” y “*IV*” se produce el aplastamiento de la madera y la formación de rótulas plásticas en el elemento de fijación.

Para las uniones con 3 elementos se plantean cuatro formas de falla. El modo “*lm*” y “*ls*” presentan aplastamiento en uno u otro miembro contra el lateral del elemento de fijación sin que este se deforme. Las formas “*lls*” y “*IV*” combinan aplastamiento de la madera y la formación de rótula plástica del elemento de fijación junto al miembro central o en los tres al mismo momento.

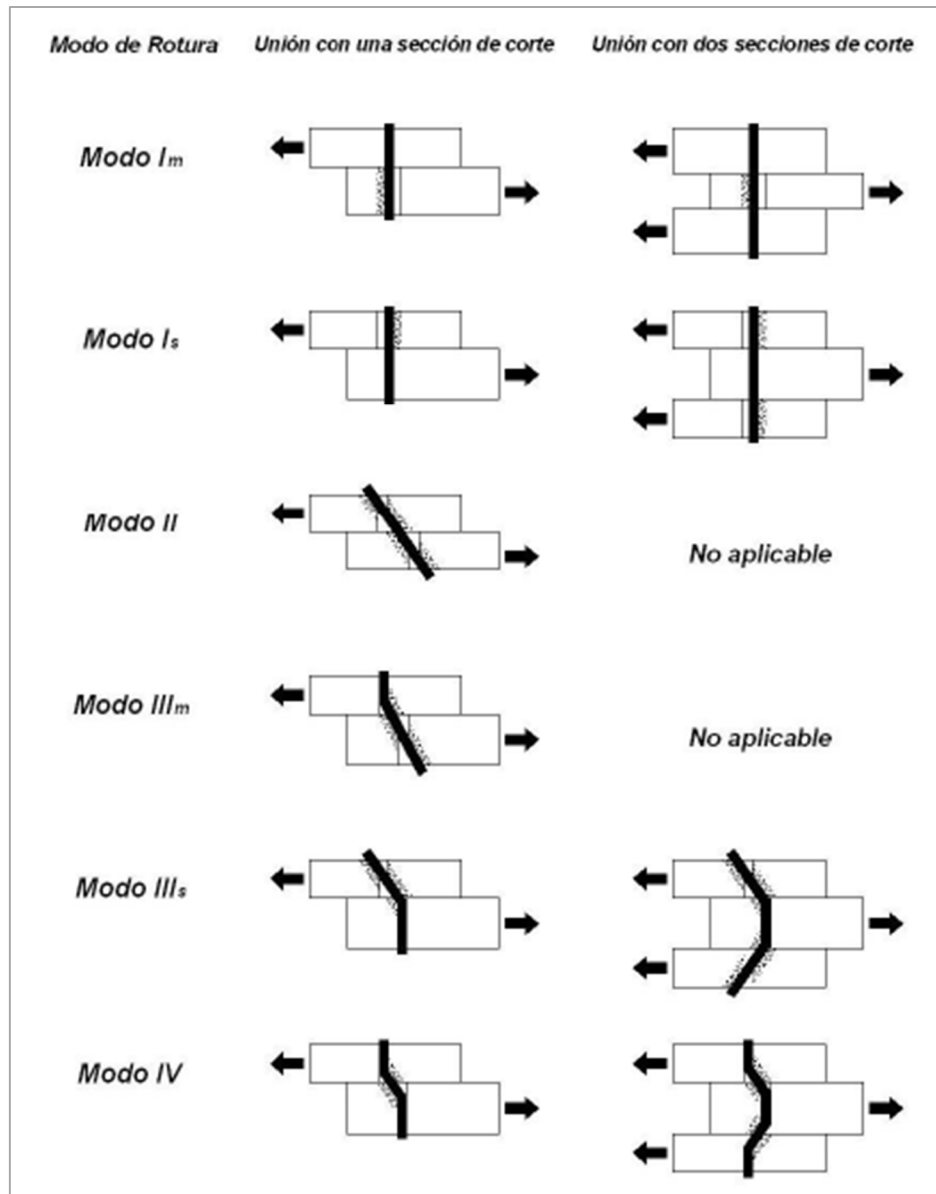


Figura 2.9: Modos de falla propuestos por Johansen para una y dos secciones de corte.

Figura extraída del INTI-CIRSOC 601 (2016) capítulo 8, pág. 81.

MATERIAL.

3.1. ÁLAMO COMO ESPECIE EN GENERAL.

Proviene de la familia de las salicáceas y pertenece al género *Populus Sp.* Es un árbol de madera blanca y follaje alto. Proviene del hemisferio norte y está integrada por unas 40 especies a las cuales se le suman sus híbridos y clones.

Las primeras plantaciones fueron en la segunda mitad del siglo XIX con álamo carolino (*Populus deltoides* subesp. *Angulata* cv. *Carolinesis*), originario del Delta del Mississippi (Estado Unidos), el cual fue afectado por roya (*Melampsoraspp*) en 1920 y dejó de cultivarse. Luego se probó el *Populus x euroamericana* de Europa el cual resultó susceptible a plagas y enfermedades. Por la década de 1960 los más plantados ocupando el 90% de la superficie de álamo fueron el Catfish 2 y el Catfish 5, pero en el 1960 se produjeron grandes ataques de roya con importantes pérdidas de cultivo. En 1970, mediante estudios de rendimiento y comportamiento ante las enfermedades se produjo una importante conversión global donde se establecieron como los clones más adecuados para las nuevas condiciones al “Australiano 106-60”, el “Australiano 129-60”, el “Stoneville 67” y el “R-22” (Cortizo 2005)

En Argentina el álamo se introdujo a mitad del siglo XIX en la Región del Delta del Río Paraná con implantaciones de 20 especies de *Populus deltoides*, entre ellos el “Australiano 129/60” el “Australiano 106/60” y el Mississippi Slim o más conocido como Stoneville 67.

El Área del Delta del Río Paraná constituye una superficie de 1.730.000 ha de las cuales las Salicáceas ocupan 83.370 ha. entre álamos y sauces constituyendo el tercer lugar de prevalencia en superficies forestadas. El álamo o chopo ocupa una extensión de aproximadamente 14.500 ha. lo cual sumado a la proximidad de estas plantaciones a las regiones más pobladas del país, hace que aumente su potencial uso como madera estructural. En la *Figura 3.1* a continuación se puede apreciar la distribución de las superficies forestadas con sauces y álamos. Con mayor detalle la *Tabla 3.1* muestra las áreas de plantaciones en cada localidad de la región del Delta.

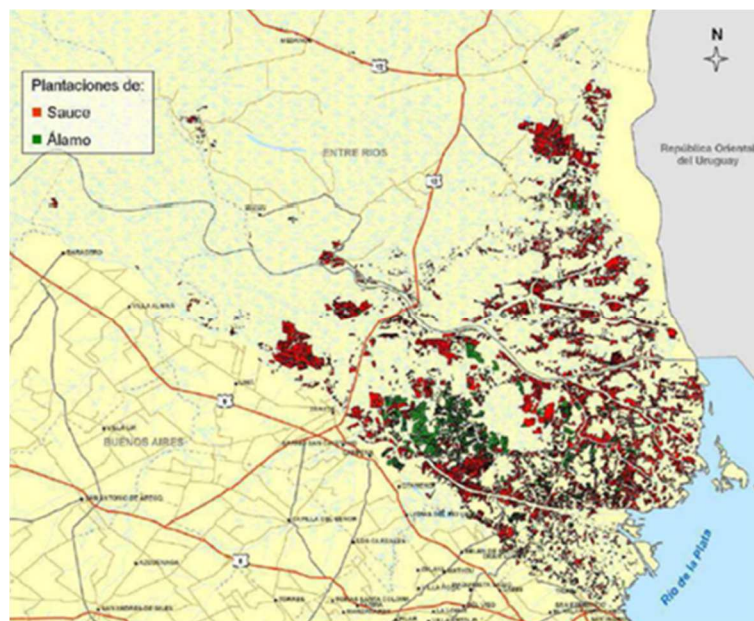


Figura 3.1: Mapa de la superficie forestada en el delta del Río Paraná.

Fuente: Área de Sistemas de Información Geográfica de la Dirección de Producción Forestal del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2011.

Tabla 3.1: Valores de superficies forestadas en el Delta del Río Paraná.

Localidad	Especie (ha)		Total (ha)
	Álamo	Sauce	Salicáceas
Baradero	-	219	219
Campana	8.243	11.792	20.035
Escobar	220	2.689	2.908
San Fernando	5.061	22.252	27.313
Tigre	279	2.824	3.103
Zárate	134	6.380	6.513
Provincia de Buenos Aires	13.936	46.155	60.091
Islas del Ibicuy	572	22.707	23.279
Provincia de Entre Ríos	572	22.707	23.279
Delta del Paraná	14.508	68.862	83.370

Fuente: Área de Sistemas de Información Geográfica de la Dirección de Producción Forestal del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2011.

La implantación se realiza en el mes de julio mediante estacas de 0.60 – 0.70 m o guías de 3 m de largo. El sistema tradicional son las estacas, pero actualmente por la incrementación de sistemas silvopastoriles en las plantaciones, las guías agilizan el ingreso del ganado a los campos. Los sistemas silvopastoriles tal como se muestra en la *Figura 3.2* consisten en la incorporación de ganado dentro de las áreas forestadas a los fines de hacer un uso más diversificado y eficiente para los productores. Para su desarrollo necesitan cantidades elevadas de luz y agua con suelos arenosos con profundidades de al menos dos metros. El turno de corta para el álamo es entre 12 y 16 años dependiendo de las necesidades y objetivos de la producción. Los rendimientos esperados son entre 200 y 400 m³ por hectárea. (Borodowsky, 2006)



Figura 3.2: Plantación de Álamo a la izquierda y plantación de Álamo con sistema silvopastoril a la derecha.

Los álamos presentan una madera muy trabajable con buenas condiciones para el aserrado o el debobinado y una textura homogénea y suave de color blanca amarillenta sin un olor característico. En sus secciones resulta dificultoso distinguir sus anillos de crecimiento y es conveniente saturarlos con agua o alcohol etílico para poder apreciarlos.

En cuanto a los ataques que presentan los álamos se encuentra el “taladrillo grande de los forestales” (*Megaplatus mutatus*) como una de las mayores plagas. Es un escarabajo de unos 8 mm de largo por 3 mm de ancho se come la madera de los árboles

en pie preferentemente con diámetros mayores a 20 cm y contenidos de humedad mayores al 50% (Cichón *et al.* 2004).

Dentro de las enfermedades que afectan a las plantaciones de álamos se encuentran roya (*Melampsora spp.*) que causa inconvenientes en las estacas y plantaciones comerciales tales como caídas de las hojas durante el verano, aumento de la susceptibilidad a las temperaturas en el invierno, retrasos en la brotación y ataque de otros parásitos; y la canchrosis (*Septoria musiva*) que es un hongo que causa mancha en las hojas y canchros en el tronco y las ramas disminuyendo su valor comercial.

En cuanto a la madera de álamo como material para uso estructural actualmente existen diversos estudios sobre las propiedades mecánicas de los diferentes clones. Para el clon “Australiano 129/60” proveniente del Delta del Río Paraná, utilizado en este trabajo de investigación se pueden encontrar algunas publicaciones con valores experimentales como Filippetti *et al.* (2015), Guillaumet *et al.* (2014) y Manavella *et al.* (2014). Además, la norma IRAM 9662/4 (2015) propone valores de referencia para la especie.

Filippetti *et al.* (2015) reporta valores para clase 1 (piezas sin médula y nudosidad hasta 1/3) valores de 28,8 N/mm² para resistencia a flexión y 8267 N/mm² para módulo de elasticidad mientras que para clase 2 (piezas con médula y nudosidad hasta 2/3) valores de 22,58 N/mm² para resistencia a flexión y 7278 N/mm².

Guillaumet *et al.* (2014) muestra para clase 1 (piezas sin médula y nudosidad hasta 1/3) valores de 39,7 N/mm² para resistencia a flexión y 9747 N/mm² para módulo de elasticidad mientras que para clase 2 (piezas con médula y nudosidad hasta 2/3) valores de 35,8 N/mm² para resistencia a flexión y 9357 N/mm². Las densidades encontradas fueron en promedio de 402 Kg/m³.

Manavella *et al.* (2017) obtuvo valores de resistencia al aplastamiento para pernos rígidos de diámetros 5, 6, 7, 8 y 10 mm. Para la dirección paralelas el valor característico para todos los diámetros fue de 21,43 N/mm² y para la dirección perpendicular fue de 12,69 N/mm². El valor característico de densidad encontrado fue de 356,96 Kg/m³.

La norma IRAM 9662/4 (2015) presenta valores de propiedades mecánicas de acuerdo a la clase resistente. Para la clase 1, reporta 24 N/mm^2 , para la resistencia a flexión y 10.200 N/mm^2 para módulo de elasticidad. Para las clases 2 los valores son 18 N/mm^2 y 9000 N/mm^2 respectivamente. La densidad es de 400 Kg/m^3 para ambas clases.

Si bien existen numerosas publicaciones que presentan valores de propiedades mecánicas para la especie, no hay demasiados estudios acerca del comportamiento de uniones múltiples. Esta situación alienta el objetivo de este trabajo de estudiar el comportamiento de uniones tipo clavija con elementos de pequeño diámetro a los fines de obtener conocimientos que aporten a la tecnología de la construcción.

3.2. ÁLAMO *POPULUS DELTOIDES* “AUSTRALIANO 129/60” PARA ENSAYOS EXPERIMENTALES.

El material para el estudio experimental proviene de plantaciones de *Populus deltoides* “Australiano 129/60” del Delta del Río Paraná.

La primera plantación fue realizada en 1996 y talada en 2009 y la segunda plantación se realizó en 2008 y se taló en 2011 obteniendo árboles de 13 años de edad en ambos casos. Fueron realizadas en una malla de 6 x 4 metros con 415 planta por hectárea. A las mismas se les practicó una poda de formación al año de plantación cuando poseían una altura de 5 metros aproximadamente. Luego a los nueve años se les realizó un raleo selectivo dejando 290 plantas por hectárea aproximadamente. Los terrenos de implantación estuvieron anegados superficialmente por períodos no mayores a 20 días y también sufrieron algunos períodos de sequía.

Luego de la tala, los troncos fueron aserrados en estado verde y trasladados al laboratorio del Grupo GIDEC (Grupo de Investigación y Desarrollo de Estructuras Civiles) en la Facultad Regional de la Ciudad de Venado Tuerto para su secado natural bajo techo cubierto.

Del material recibido se seleccionaron 30 tablas de 25 mm x 100 mm de 2,20 m de largo las cuales fueron almacenadas hasta que alcanzar una humedad inferior al 20% y

luego fueron cepilladas a los fines de obtener secciones homogéneas libres de deformaciones lo cual redujo su espesor a 22 mm. De las mismas se extrajeron los diferentes trozos libres de defectos que luego se utilizaron para confeccionar las probetas de los ensayos. Todas las piezas se almacenaron en una cámara controlada para su estabilización a una temperatura de (20 ± 2) °C y una Humedad relativa ambiente de (65 ± 5) % hasta el momento de confeccionar las probetas para los ensayos.

METODOLOGÍA.

En este capítulo, se detalla la metodología que se llevó a cabo para los ensayos. En la primera parte se explican las pautas de diseño y preparación de las muestras que se utilizaron en el desarrollo experimental, así como también los pasos del procedimiento de ensayo. En la segunda parte se desarrolla la metodología de cálculo de las uniones propuesta por el Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) que se utilizó a los fines de obtener resultados comparables con los valores experimentales.

4.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

4.1.1. Preparación de los cuerpos de ensayo.

Con el material previamente seleccionado tal como se desarrolló en el capítulo anterior se construyeron 49 probetas de las cuales 4 fueron utilizadas en una etapa preliminar para la preparación y calibración de los equipos y 45 fueron utilizadas para el desarrollo de los ensayos propiamente dicho. El total de las muestras estaba constituido por uniones múltiples clavadas dispuestas paralelas y perpendicularmente para dos distribuciones diferentes de clavos de las cuales 13 eran uniones paralelas con 6 clavos, 12 paralelas con 9 clavos, 12 perpendiculares con 6 clavos y 12 perpendiculares con 9 clavos.

La preparación de las uniones se llevó a cabo de acuerdo a las especificaciones de la norma europea EN 1380 (2009) y la distribución geométrica de los clavos se realizó cumpliendo las distancias mínimas indicadas en el Capítulo 8 del Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016). En la *Tabla 4.1* se indican las distancias mínimas que deben cumplir los elementos de fijación las cuales se relacionan directamente a su diámetro. Las mismas se pueden ubicar gráficamente en la *Figura 4.1*.

En las *Figuras 11, 12, 13 e 14* del Anexo I se pueden ver gráficamente los diseños adoptados para las probetas, las ubicaciones de los apoyos y de las cargas y las distancias finalmente adoptadas para cada distribución. Cabe aclarar que algunas magnitudes fueron

mayores que las mínimas debido a que era necesario completar el ancho en las tablas seleccionadas.

Tabla 4.1: Distancias mínimas para clavos con diámetro $D = 2.5$ mm.

Dirección	Distancia	Magnitud en relación al diámetro "D"	Magnitud para $D = 2,5$ mm [mm]
PARALELA	Al borde	5 D	12,5
	Al extremo cargado	15 D	37,5
	Al extremo descargado	10 D	25
	Entre elementos de la fila	15 D	37,5
	Entre filas	5 D	12,5
PERPENDICULAR	Al borde cargado	10 D	25
	Al borde descargado	5 D	12,5
	Al extremo	10 D	25
	Entre elementos de la fila	10 D	25
	Entre filas	5 D	12,5

Confecionada de acuerdo a Tabla 8.2-2, Capítulo 8, INTI-CIRSOC 601 (2016).

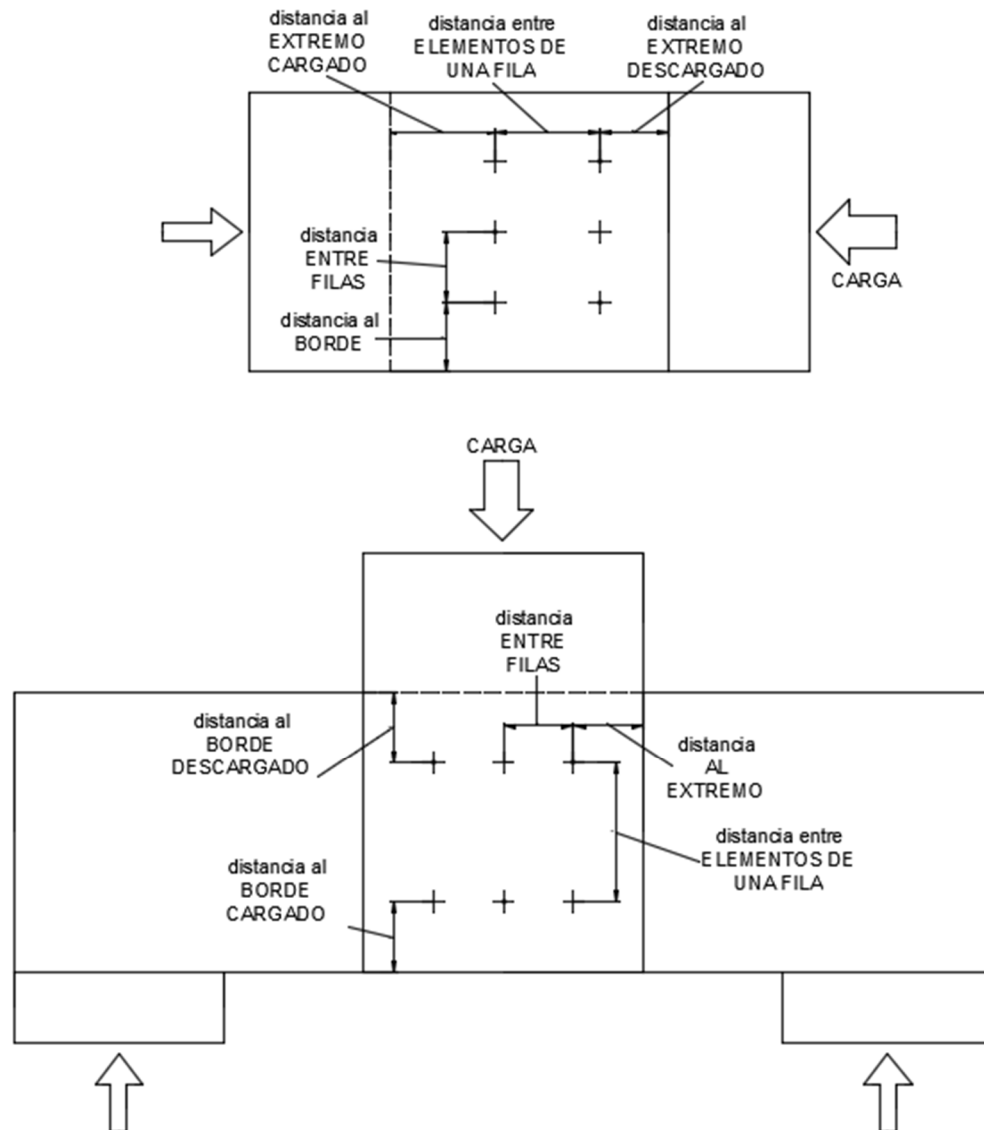


Figura 4.1: Distancias para elementos de fijación en uniones paralela y perpendicular.

Confeccionada de acuerdo a Figura 8.2-3, Capítulo 8, INTI-CIRSOC 601 (2016).

Se utilizaron clavos espiralados de 2,5 mm de diámetro y 75 mm de largo colocados mediante una clavadora neumática marca Dorking CNR75 la cual se puede apreciar en la *Figura 4.2* al igual que los clavos. Los mismos se colocaron distribuidos en partes iguales en ambas caras de la probeta y debido a la disminución del espesor de las tablas por el cepillado, se cortaron los extremos de los clavos que sobresalían, a los fines de evitar que los mismos interfirieran contra el dispositivo de ensayo.

Una vez contruidos, todos los cuerpos de ensayos fueron almacenados nuevamente en cámara controlada hasta el momento del ensayo.



Figura 4.2: Clavadora neumática de clavos Dorking CNR75 y rollo de clavos.

4.1.2. Procedimiento de ensayo.

Las ejecuciones de los ensayos siguieron los procedimientos indicados en la norma EN 1380 (2009), en las instalaciones del laboratorio de estructuras de madera de la Facultad Regional Venado Tuerto.

Las pruebas se efectuaron bajo un pórtico de carga y el esfuerzo se aplicó mediante un pistón hidráulico con una capacidad de 20 Tn. El mismo posee una válvula reguladora de caudal manual, la cual se puede variar según la velocidad de carga necesaria. La medición de la carga se realizó mediante una celda de carga de 1000 Kg y 2000 Kg para uniones con 6 y 9 clavos respectivamente. Se aseguró la verticalidad de la aplicación de la carga mediante una rótula metálica colocada entre el dispositivo hidráulico y la probeta. Las deformaciones fueron medidas usando dos relojes comparadores digitales marca Mitutoyo de rango 0-25,4 mm, y lectura de 0,01 mm, dispuestos simétricamente a ambos lados. En la *Figura 4.3* se pueden apreciar dos probetas preparadas para comenzar el ensayo con los mecanismos de aplicación de carga y los dispositivos para toma de mediciones.



Figura 4.3: Probeta de dirección perpendicular a la izquierda y probeta de dirección paralela a la derecha, dispuestas para comenzar la prueba.

La lectura de los valores fue simultánea para carga y deformaciones mediante un software de adquisición desarrollado entre el Grupo GIDEC (Grupo de Investigación de Estructuras Civiles) y el área de Electrónica y Sistemas del INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). La *Figura 4.4* muestra el esquema de funcionamiento del sistema el cual consiste en una computadora portátil con el software antes mencionado como destino de procesamiento de los datos. La medición de los comparadores es captada por un multiplexor Mitutoyo de 8 entradas que traslada los datos a la PC mediante un puerto USB. La medición de la carga de la celda es tomada por un cabezal de lectura que luego transfiere los datos a la PC por un cable USB. El registro de los datos se realizó en intervalos de 2 segundo permitiendo de esa forma obtener los valores necesarios para cada etapa del ciclo de carga.

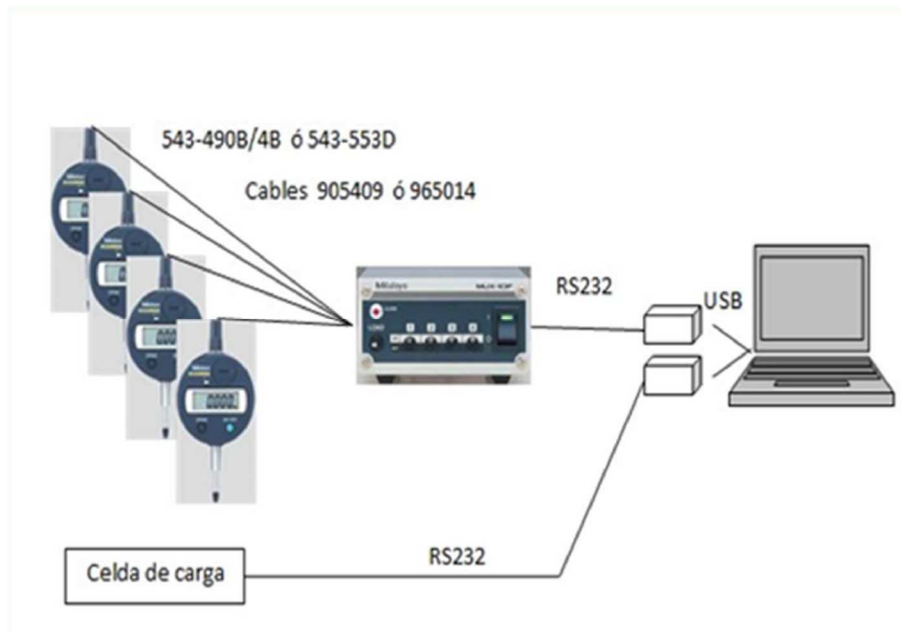


Figura 4.4: Esquema de conexiones de sistema de adquisición de datos.

4.1.3. Aplicación de la carga.

La aplicación de la carga cumplió con el procedimiento dado por la Norma UNE-EN 26891 (1992), el cual fue ajustado a través del valor de carga máxima F_{max} , obtenido en ensayos de prueba previos.

Como se muestra en la *Figura 4.5* el procedimiento de carga consta de dos etapas. La primera etapa (desde el punto 0 al 04) que consiste en incrementar la fuerza hasta alcanzar el 40% de la carga máxima estimada en un tiempo de 120 segundos, mantener dicho valor durante 30 segundos, descargar hasta el 10% de la fuerza máxima estimada en un tiempo de 90 segundos y volver a mantener constante ese valor durante 30 segundos.

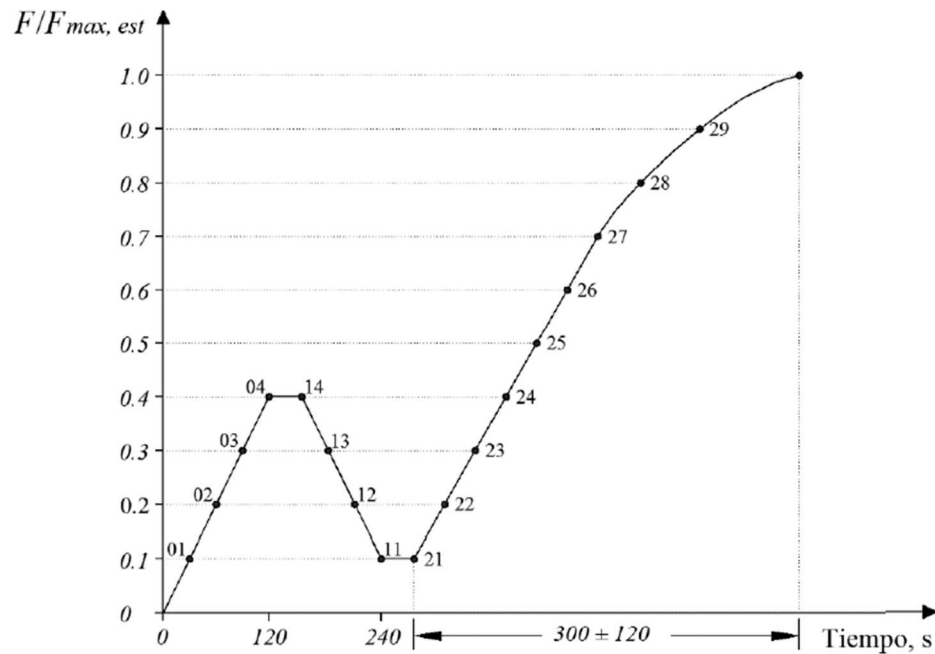


Figura 4.5: Ciclo de carga para ensayo según UNE-EN 26891 (1992).

A partir de ese punto se inicia el ciclo de carga final que consiste en la aplicación de la carga en forma progresiva hasta la finalización del ensayo. Los ensayos se detienen cuando se llega a la carga máxima, por rotura física de la probeta, o cuando la deformación relativa alcanza un valor de 15 mm. La carga se aumenta o disminuye con velocidad de deslizamiento constante del cabezal de carga y la fuerza máxima debe alcanzarse en un tiempo de 300 ± 120 segundos a partir del ciclo de carga previo (punto 21).

Para cada probeta se registró la fuerza aplicada, el tiempo y las deformaciones correspondientes a los puntos indicados en el procedimiento de carga, como la media entre las lecturas de los dos comparadores. La determinación de la humedad y de la densidad de cada probeta se realizó de acuerdo a las normas ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975). Se ajustaron los valores de densidad a la humedad de referencia del 12%, de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 384:2010.

4.2. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LAS UNIONES MÚLTIPLES SEGÚN INTI-CIRSOC 601 (2016).

Las uniones múltiples son aquellas que se están formadas por dos o más elementos de fijación, como las que habitualmente se utilizan en la industria de la construcción. Cuando los elementos que la componen presentan dimensiones similares con el mismo modo de rotura y a su vez son del mismo tipo el valor de resistencia lateral de diseño es igual a la suma de la resistencia lateral de diseño de cada uno de sus elementos. Cuando las uniones se componen de un único elemento de fijación se denominan uniones simples.

El Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) en su Suplemento 4 propone valores de resistencia al aplastamiento de la madera y tensiones de fluencia de elementos de fijación de acero los cuales permiten mediante una serie de expresiones obtener una resistencia de diseño de referencia para uniones simples. Luego para obtener el valor de resistencia lateral de diseño para uniones múltiples basta con multiplicar el valor antes obtenido por la cantidad de elementos que tenga en la unión múltiple.

Para la obtención de la resistencia lateral de diseño “**Z**” el reglamento asigna una expresión de cálculo por cada modo de falla establecido en el modelo de Johansen. (ver Capítulo 2). A su vez las expresiones son diferentes para uniones con una o dos secciones de corte. La *Tabla 4.2* muestra las expresiones para el cálculo mencionadas anteriormente las cuales están en función de los parámetros geométricos y resistencia de sus elementos. La resistencia lateral de diseño de referencia será el menor valor obtenido de dichas expresiones.

Todas las expresiones están afectadas por un coeficiente de reducción “**Rd**” el cual actúa como coeficiente de seguridad aminorando la resistencia de rotura de la unión y llevándola a un valor de resistencia admisible. El valor del mismo se encuentra en función al diámetro de los elementos de fijación y al ángulo entre la dirección de aplicación de la fuerza y la dirección de las fibras. En el caso de las uniones múltiples clavadas que poseen clavos de pequeños diámetros menores a 4,3 mm el factor **Rd** es igual a 2,2 independientemente de los parámetros antes mencionados. Para este trabajo se

considera al factor $R_d = 1$ para obtener resistencias de rotura y poder relacionarlos directamente con los resultados experimentales.

Tabla 5.5: Expresiones para cálculo de resistencias de diseño.

Modo de Rotura	Expresión para dos secciones de corte.	Expresión para dos secciones de corte.
I _m	$Z = \frac{Dl_m F_{em}}{R_d}$	$Z = \frac{Dl_m F_{em}}{R_d}$
I _s	$Z = \frac{Dl_s F_{es}}{R_d}$	$Z = \frac{2Dl_s F_{es}}{R_d}$
II	$Z = \frac{k_1 D l_s F_{es}}{R_d}$	---
III _m	$Z = \frac{k_2 D l_m F_{em}}{(1 + 2R_e) R_d}$	---
III _s	$Z = \frac{k_3 D l_s F_{em}}{(2 + R_e) R_d}$	$Z = \frac{2k_3 D l_s F_{em}}{(2 + R_e) R_d}$
IV	$Z = \frac{2D^2}{R_d} \sqrt{\frac{2F_{em}F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$	$Z = \frac{2D^2}{R_d} \sqrt{\frac{2F_{em}F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$

D: diámetro nominal del elemento de fijación.

F_{em}: resistencia al aplastamiento de referencia del miembro principal.

F_{es}: resistencia al aplastamiento de referencia del miembro lateral.

F_{yb}: tensión de fluencia en flexión del elemento de fijación. *Tabla S.4.1.1-3 Suplemento 4 INTI-CIRSOC 601(2016)*

l_m: longitud del elemento de fijación dentro del miembro principal.

l_s: longitud del elemento de fijación dentro del miembro lateral.

R_a: Coeficiente de reducción.

R_e: F_{em}/F_{es}

R_t: l_m/l_s

$$k_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2(1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 + R_e^3 - R_e(1 + R_t)}}{(1 + R_e)}$$

$$k_2 = -1 + \sqrt{2(1 + R_e) + \frac{2F_{yb}(1 + 2R_e)D^2}{3F_{em}l_m^2}}$$

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1 + R_e)}{R_e} + \frac{2F_{yb}(2 + R_e)D^2}{3F_{em}l_s^2}}$$

Extracción de Tabla 8.2.1.1-1 del INTI-CIRSOC 601 (2016).

A los fines de obtener una resistencia de diseño ajustada **Z'** el Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) indica que se debe afectar la resistencia de diseño de referencia **Z** con una serie de coeficientes que ajustan los valores obtenidos a las condiciones existentes.

En cuando al factor de duración de la carga “**C_d**” el Suplemento 4 del reglamento ya provee de valores que consideran una duración de la carga normal de 10 años por lo cual se utilizó un **C_d** = 1.

El factor de condición de servicio utilizado fue “**C_M**” = 1 debido a que las uniones consideradas se encuentran en un ambiente cubierto y seco. En el caso que las condiciones de humedad ambiente no sean las indicadas el reglamento en la Tabla 8.2.1.2-2 del Capítulo 8 menciona los coeficientes para otras condiciones.

El factor de temperatura utilizado fue el correspondiente a temperaturas menores a 40°C con un valor de **C_t** = 1. En el caso de temperaturas mayores se especifican los coeficientes en la Tabla 8.2.1.2-3 del Capítulo 8.

El factor de acción de grupo fue **C_g** = 1 debido a que los elementos de fijación poseen un diámetro menor a 6,35 mm.

El factor de clavado oblicuo **C_{tn}** fue considerado igual a 1 debido a que todos los elementos de fijación fueron clavados perpendicularmente a la superficie.

Debido a que todos los coeficientes de ajuste son igual a 1, resulta **Z** = “**Z**”

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos del programa teórico y experimental de este trabajo. En primer lugar, se muestra el comportamiento experimental de las uniones múltiples aportando valores de desplazamiento y resistencia de rotura conjuntamente con las humedades y densidades obtenidas de las muestras ensayadas y la comparación con otras publicaciones realizadas para la misma especie. Luego se muestran los cálculos para la obtención de la resistencia teórica de rotura de las uniones y el análisis comparativos entre los resultados alcanzados. Por último, se realiza un análisis general comparando los resultados experimentales con los teóricos y se abordan las conclusiones finales para este trabajo.

5.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

5.1.1. Resistencias de las uniones.

Según los principios generales que establece la norma europea EN 1380 (2009) para la determinación de las características resistentes, se considera como carga máxima para la probeta a aquella alcanzada antes o en un desplazamiento de 15 mm relativo entre sus elementos. Es decir, la prueba finaliza una vez que la probeta llegó al límite de resistencia o al momento que ha sufrido una deformación de 15 mm entre sus miembros.

En las pruebas realizadas, los comportamientos para cada dirección de uniones fueron bien notorios. Las uniones paralelas alcanzaron su resistencia máxima por desplazamiento, mientras que las uniones perpendiculares la alcanzaron al momento de la falla del material. Tal como como se muestra en la *Tabla 5.1*, en las uniones paralelas los desplazamientos relativos entre sus miembros, alcanzan valores medios de 14,88 mm y 14,53 mm, próximos al máximo estipulado por norma, mientras que en las uniones perpendiculares los desplazamientos alcanzan un 35% del máximo con valores de 4,87 mm y 4,99 mm.

Tabla 5.1: Desplazamiento relativo entre miembros de la unión al momento de alcanzar $F_{máx}$ de rotura.

Parámetro	Unidad	Desplazamientos			
		Unión paralela		Unión perpendicular	
Nº Clavos	n	6	9	6	9
Media	mm	14,88	14,53	4,87	4,99
Desvío	mm	0,34	0,32	2,19	0,82
Max	mm	15,51	15,11	10,83	6,30
Min	mm	14,36	13,79	2,70	3,27
Percentil 5%	mm	14,42	14,05	2,98	3,71
COV	%	2	2	45	16
Cant. Prob.	n	12	11	11	11

La forma en la que se alcanza la carga máxima tiene que ver con el mecanismo que utiliza cada tipo de unión para resistir la fuerza aplicada. En la disposición paralela, los clavos utilizados aplastan longitudinalmente las fibras de la madera, ya que todos los miembros que conforman la unión tienen sus fibras orientadas en la dirección de la carga. A medida que la fuerza aumenta, el desplazamiento de los clavos entre las fibras se acelera, pero no se producen caídas en la capacidad de carga. Se puede ver que este tipo de uniones falla por exceso de desplazamiento. Por el contrario, en las uniones con disposición perpendicular las fibras tubulares de la madera del miembro central que se encuentran orientadas perpendicular al sentido de aplicación del esfuerzo y sufren una compresión lateral que comienza con una deformación elástica de la pared celular y termina con el colapso de la misma. A medida que las carga aumenta se generan colapsos sucesivos en capas los cuales se muestran en los ensayos experimentales como reiteradas caídas en la capacidad de carga.

En la *Figura 5.1* a continuación se observan las diferencias de desplazamiento que se produjeron en las muestras ensayadas. A la izquierda se ve una probeta de dirección

paralela con un desplazamiento máximo permitido y a la derecha una probeta perpendicular con un desplazamiento menor.

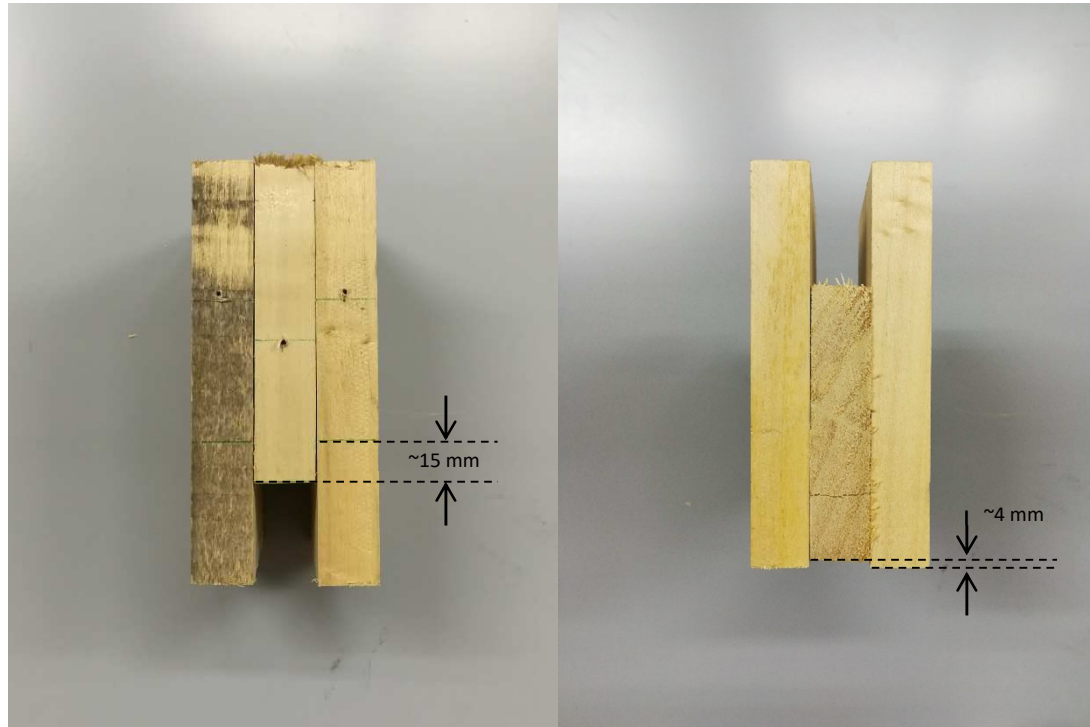


Figura 5.1: Estado de las probetas una vez finalizada la prueba.

A la izquierda unión paralela, a la derecha unión perpendicular.

La *Tabla 5.2* muestra los valores de resistencia que arrojó la investigación al momento de la rotura para cada tipo de unión en un tiempo aproximado de ensayo de 10 min. Se obtuvieron valores medios de 17754 N y 24331 N para uniones paralelas con 6 y 9 clavos respectivamente y 10793 N y 16604 N para uniones perpendiculares con 6 y 9 clavos respectivamente. Las variaciones de los resultados se mantuvieron bajas con valores de COV que no superaron el 7% para uniones paralelas y 19% para uniones perpendiculares.

Tabla 5.2: Valores experimentales de resistencia de rotura de uniones múltiples para un tiempo de duración de carga de 10 min.

Resistencia de rotura					
Parámetro	Unidad	Unión paralela		Unión perpendicular	
N.º Clavos	n	6	9	6	9
Media	N	17.754	24.331	10.793	16.604
Desvío	N	1.174	1.280	2.031	1.830
Max	N	19.090	25.900	15.120	19.430
Min	N	14.860	21.920	8.130	13.300
Percentil 5%	N	15.663	22.205	8.505	13.815
COV	%	7	5	19	11
Cant. Prob.	n	12	11	11	11

Si se comparan los valores de resistencia de las muestras con el mismo número de fijaciones, resulta que las uniones paralelas mostraron una resistencia notablemente mayor que las dispuestas en forma perpendicular. En las uniones con 6 clavos se observa que las de dirección paralela superan en capacidad de carga a las perpendiculares en un 64% con valores medios de 17.754 N y 10.793 N respectivamente y en las uniones con 9 clavos las paralelas superan a las perpendiculares en un 46% con valores medios de 24.331 N y 16.604 N respectivamente. Esta diferencia encontrada se puede apreciar con claridad en los gráficos de cajas y bigotes mostrados en las *Figura 5.3* y *Figura 5.4*.

En la *Figura 5.2* se muestra de manera genérica un gráfico de caja y bigotes. Tal como lo expresa el nombre están formados por una caja central con líneas a cada lado denominadas bigotes los cuales están formados por el límite inferior $Li = Q1 - 1,5 IQR$, en un extremo y el límite superior $Ls = Q3 + 1,5 IQR$ en el extremo opuesto. Dichos parámetros delimiten el rango de datos del gráfico. Los valores que se encuentren fuera de esos límites son considerados valores atípicos At. Entre los bigotes del gráfico se encuentra la caja delimitada en un extremo por el primer cuartil Q1 correspondiente al 25% de la muestra y en el extremo opuesto por el tercer cuartil Q3 correspondiente al 75%

de la muestra. La diferencia entre estos dos parámetros se denomina rango intercuartílico $RIQ = Q3 - Q1$. La línea que divide la caja en dos partes es la que corresponde al segundo cuartil $Q2$ correspondiente al 50% de los valores de la muestra. El punto ubicado dentro de la caja señalado con una x corresponde a la mediana que es el valor promedio entre todos los valores de la muestra.

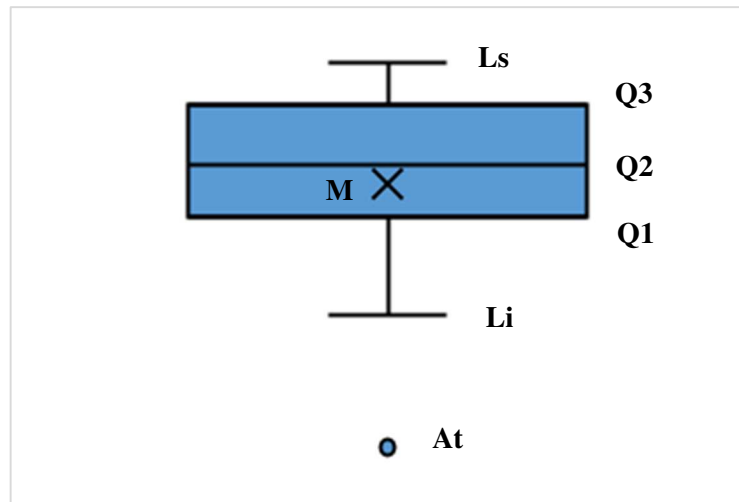


Figura 5.2: Gráfico de caja y bigotes.

Ls: Límite superior, *Li*: Límite inferior, *Q1*: Primer cuartil (25%), *Q2*: Segundo Cuartil (50%) o Mediana, *Q3*: Tercer cuartil (75%), *RIQ*: Rango intercuartílico, *At*: Valor atípico, *M*: Mediana o promedio.

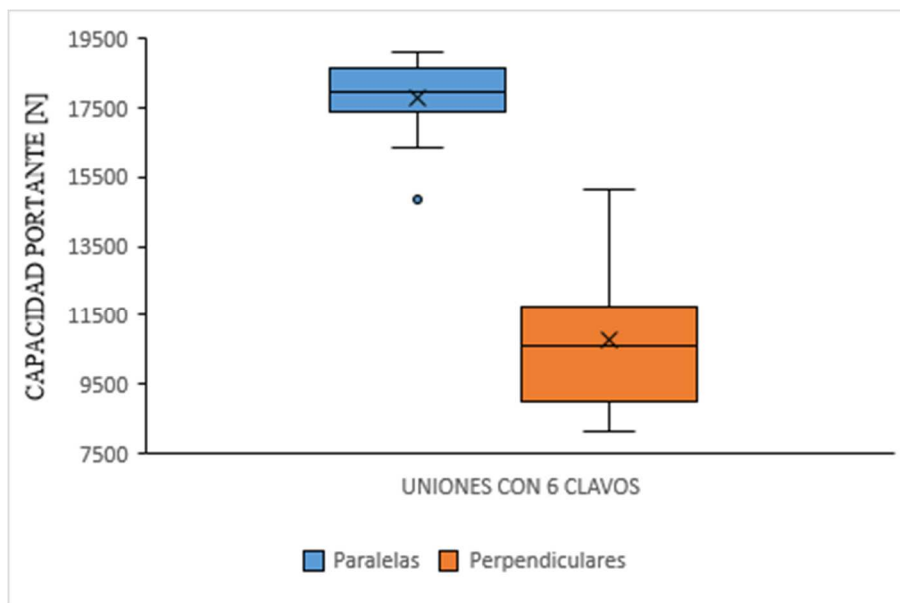


Figura 5.3: Gráfico de caja y bigotes para resistencia de rotura de uniones con 6 clavos [N].

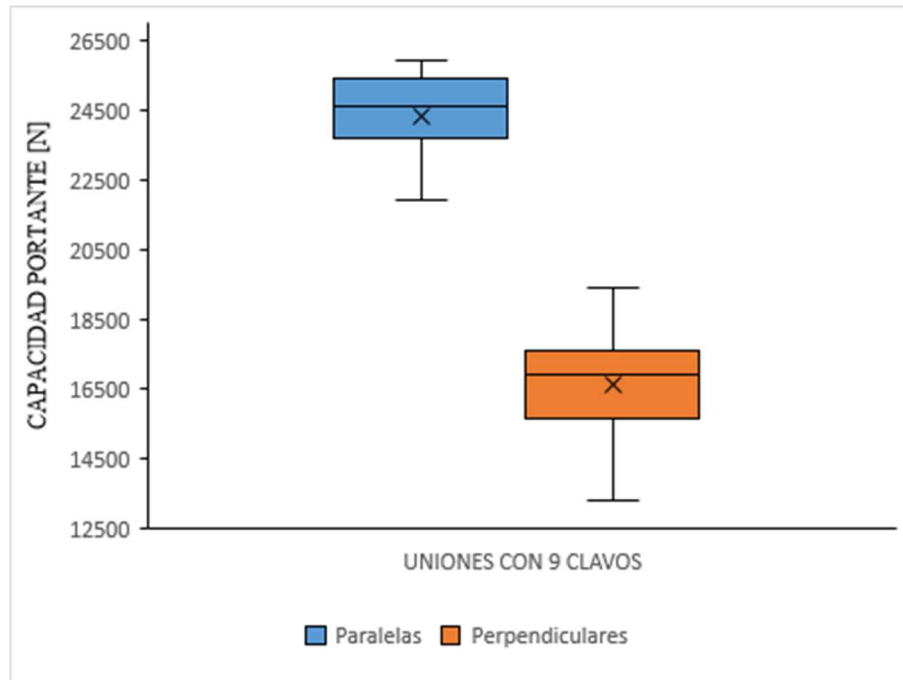


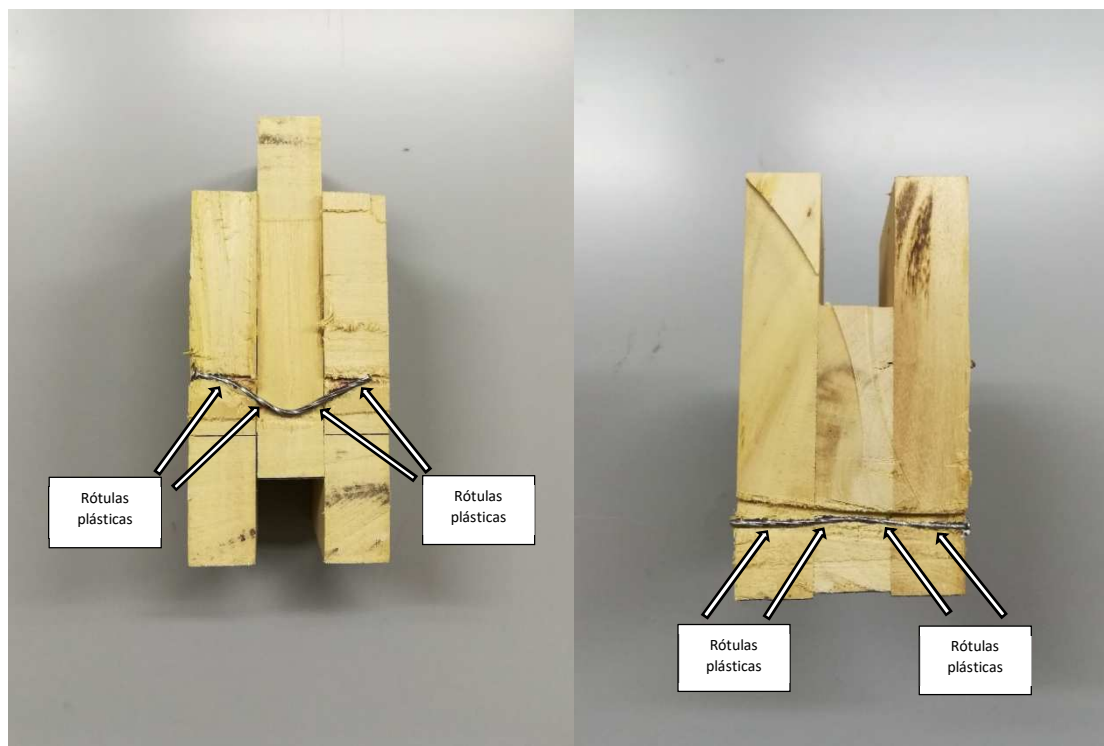
Figura 5.4: Gráfico de caja y bigotes para resistencia de rotura de uniones con 9 clavos [N].

Al analizar los valores dentro de cada dirección de carga se puede observar que al pasar de probetas de 6 clavos a 9 clavos la cantidad de fijaciones se ha aumentado en un 50%. Para la dirección paralela se observa un crecimiento de la resistencia de un 37% mientras que para la dirección perpendicular el incremento es del 53%.

Estos resultados indican que en la dirección paralela respetando las separaciones constructivas entre fijaciones propuestas por el Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) el incremento en la resistencia de la unión no es proporcional a la cantidad de elementos que se agregan, lo cual podría indicar que la separación entre elementos utilizada no permite el total desempeño de cada fijación. En cambio, para la dirección perpendicular la resistencia si presenta un incremento proporcional demostrando una distribución eficiente.

Tal como se desarrolló en el Capítulo 4 la reglamentación desarrolla los diferentes modos de falla que se relacionan con los valores máximos de resistencia característica que adquieren las uniones. Al observar las probetas ensayadas se evidencia que tanto las de dirección paralela como las de dirección perpendicular mostraron fallas de modo IV. La Figura 5.5 a continuación muestra a la izquierda la sección de una unión

paralela y a la derecha la sección de una unión perpendicular. En la unión paralela se aprecia a la izquierda en el lado donde se encuentra la cabeza del clavo la formación de las dos rótulas plásticas mientras que del lado derecho donde se encuentra la punta del clavo, se aprecia la formación de una rótula plástica ya que la cuarta no se ha terminado de formar debido al desplazamiento del clavo dentro de la madera. De todos modos, la forma general condice con el modo de rotura IV. En la unión perpendicular se puede apreciar la misma formación de las rótulas, pero con menor deformación. Posteriormente mediante los cálculos propuestos por el INTI-CIRSOC 601 (2016) se podrá verificar teóricamente los modos de fallas experimentales alcanzados.



*Figura 5.5: Formación de rótulas plásticas en probetas ensayadas.
A la izquierda sección de unión paralela, a la derecha sección de unión perpendicular.*

5.1.2. Determinación del contenido de humedad y de la densidad.

Mediante los procedimientos estipulados por la norma ISO 3130 (1975) se obtuvieron los contenidos de humedad para cada probeta los cuales se muestran en la

Tabla 5.3. Los resultados arrojaron un contenido de humedad medio para el total de la muestra del 9,26% con una COV del 3,41%.

Las densidades de las muestras se obtuvieron como lo indica la norma ISO 3131 (1975) y a los fines de obtener valores de densidad comparables, se ajustan los mismos según la norma UNE-EN 384 (2010) que establece una corrección a una humedad de referencia del 12% para probetas con contenido de humedad entre 8% y 18%. Debido a que los valores de humedad de las muestras se encuentran entre dichos parámetros, con una media de 9,26% se realiza el ajuste correspondiente de todos los datos. El valor medio obtenido para el total de la muestra es de 417 Kg/m³ con una variación de 6%. La *Tabla 5.4* a continuación muestra las densidades corregidas al valor de referencia para cada dirección y cantidad de fijaciones.

Si se toman datos publicados para la misma especie se puede observar que Guillaumet *et al.* (2014) presentan un valor medio de densidad corregida de 402,33 Kg/m³ y Manavella *et al.* (2017) muestran un valor medio de 398,87 Kg/m³. Si se analizan estas densidades primeramente se puede observar que ambos valores son muy próximos entre sí con una diferencia que no supera el 1%. En segundo lugar, se aprecia que estos resultados son levemente inferiores a los obtenidos para la especie en este trabajo con una diferencia promedio entre ellos del 4%.

Tabla 5.3: Valores de contenido de humedad de las probetas al momento del ensayo.

Contenido de Humedad						
Parámetro	Unidad	Unión paralela		Unión perpendicular		Todas
Nº Clavos	n	6	9	6	9	
Media	%	9,13	8,92	9,55	9,45	9,26
Desvío	%	0,33	0,35	0,32	0,25	0,40
Percentil 5%	%	8,79	8,63	9,12	9,04	8,66
COV	%	3,62	3,94	3,37	2,69	4,30
Cant. Prob.	n	12	11	11	11	45

Contenido de humedad según norma ISO 3130 (1975).

Tabla 5.4: Valores de densidad específica al 12% de humedad.

Densidad corregida al 12%						
Parámetro	Unidad	Unión paralela		Unión perpendicular		Todas
Nº Clavos	n	6	9	6	9	
Media	Kg/m ³	442	416	398	411	417
Desvío	Kg/m ³	44	21	20	23	33
Percentil 5%	Kg/m ³	395	387	371	384	378
COV	%	10	5	5	6	8
Cant. Prob.	n	12	11	11	11	45

Densidad según norma ISO 3131 (1975) y corregida a una humedad de referencia del 12% mediante UNE-EN 384 (2010).

5.2. RESISTENCIA TEÓRICA DE ROTURA DE LAS UNIONES MEDIANTE REGLAMENTO INTI-CIRSOC 601 (2016).

El INTI-CIRSOC 601(2016) en el suplemento 4 permite determinar la resistencia al aplastamiento de referencia a partir de la densidad anhidra. Para determinar el valor de densidad anhidra se propone la siguiente expresión.

$$G = \frac{G_{mc}}{(1 + mc) - 0,84 \cdot mc \cdot G_{mc}}$$

G = Gravedad específica.

G_{mc} = Gravedad específica a un determinado contenido de humedad.

mc = Contenido del agua como cociente entre el peso de agua contenida y el peso anhidro.

Para el total de la muestra, los cálculos arrojaron un valor característico percentil 5% de $G = 0,36$ con una COV de 7%. Utilizando dicho valor como dato de entrada en la Tabla S.4.1.1-1 del Suplemento 4 del Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) se obtienen los valores de tensiones de aplastamiento para diámetros menores a 6,35 mm, en adelante F_c , los cuales son iguales para ambas direcciones con un valor de 17,5 N/mm² como se muestra en la Tabla 5.4.

Manavella *et al.* 2017 reportan resultados experimentales de tensiones de aplastamiento en pasadores de pequeño diámetro para un tiempo de duración de carga de 10 años en adelante F_E , los cuales difieren según la dirección de las fibras con valores correspondientes al percentil 5% de 14,11 N/mm² para la dirección paralela y 9,77 N/mm² para la dirección perpendicular. Dado que el reglamento hace un corte en pernos con diámetros de 6,35 mm los valores antes mencionados se obtuvieron como el promedio entre pernos de 5 mm y 6 mm en la dirección paralela y perpendicular. Ver *Tabla 5.4*.

Como los datos experimentales se adquieren mediante ensayos con una duración de 10 min., mientras que los valores de diseño de referencia propuestos por la norma consideran un tiempo acumulado de duración de la carga de 10 años el Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) contempla en la Tabla 4.3-2 del Capítulo 4, un factor de reducción de la carga $C_d = 1,6$ ya que la madera tiene la capacidad de soportar cargas mayores cuando esta actúa tiempos cortos que cuando lo hacen en tiempos prolongados. De esta forma al dividir los valores experimentales por el coeficiente C_d fue posible trasladar los resultados experimentales a una duración de carga de 10 años y compararlos con los valores obtenidos mediante el reglamento.

Tabla 5.4: Valores de resistencia al aplastamiento para pernos de pequeño diámetro ($D < 6,35\text{mm}$) y duración de carga de 10 años

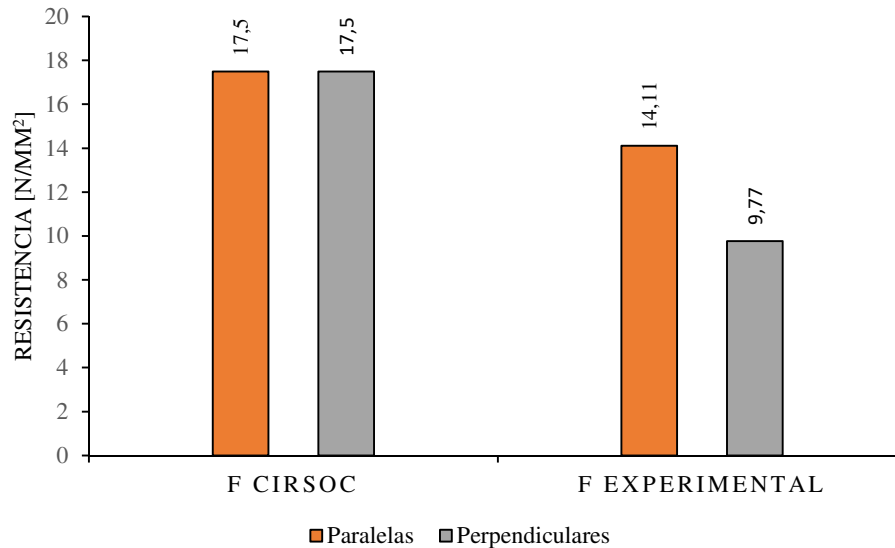
Resistencia al Aplastamiento			
Parámetro	Unidad	Paralela	Perpendicular
F_C (1)	N/mm ²	17,5	17,5
F_E (2)	N/mm ²	14,11	9,77

F_C : Valor de cálculo obtenido mediante procedimiento del INTI-CIRSOC 601 (2016) a partir del valor G experimental. F_E : Corresponde al valor percentil 5% de la muestra experimental Manavella *et al.*, 2017.

Del análisis resulta que las tensiones experimentales F_E no poseen el mismo valor para ambas direcciones tal como lo considera el reglamento para fijaciones con diámetro menor a 6,35 mm. siendo la tensión paralela un 44% mayor que la tensión perpendicular. Además, se observa que las tensiones F_C obtenidas mediante el INTI-CIRSOC 601 (2016)

son mayores que las F_E alcanzadas experimentalmente en un 24% en la dirección paralela y un 79% en la dirección perpendicular. Ver *Figura 5.6*.

Figura 5.6: Gráficos de resistencia al aplastamiento para una duración de carga de 10 años [N/mm²].



F CIRSOC: Valor de cálculo obtenido mediante procedimiento del INTI-CIRSOC 601 (2016) a partir del valor G experimental. F EXPERIMENTAL: Corresponde al valor percentil 5% de la muestra experimental Manavella et al, 2017.

Una vez identificados los valores de tensiones de referencia F_C y F_E necesarios para el cálculo se procede a determinar la resistencia de diseño para cada tipo de unión planteada con ambos valores. El cálculo se realiza siguiendo los lineamientos propuestos por el INTI-CIRSOC 601 (2016) en su Capítulo 8.

La reglamentación propone una serie de expresiones para la obtención de la resistencia de diseño de referencia “ Z ”, de acuerdo a cada modo de falla que pueda presentar la unión tal como se desarrolló anteriormente en el Capítulo 4 de este trabajo. La *Tabla 5.5* muestra las expresiones correspondientes a uniones con dos secciones de corte como las que se tratan en esta investigación. Debido a que no es posible predecir la forma de rotura de las conexiones, se considera como valor de diseño, al modo de rotura con menor resistencia.

Tabla 5.5: Expresiones para cálculo de resistencias de diseño.

Modo de Rotura	Expresión para dos secciones de corte.
I _m	$Z = \frac{Dl_m F_{em}}{R_d}$
I _s	$Z = \frac{2Dl_s F_{es}}{R_d}$
III _s	$Z = \frac{2k_3 D l_s F_{em}}{(2 + R_e) R_d}$
IV	$Z = \frac{2D^2}{R_d} \sqrt{\frac{2F_{em} F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$

D: diámetro nominal del elemento de fijación.

F_{em}: resistencia al aplastamiento de referencia del miembro principal.

F_{es}: resistencia al aplastamiento de referencia del miembro lateral.

F_{yb}: tensión de fluencia en flexión del elemento de fijación. *Tabla S.4.1.1-3 Suplemento 4 INTI-CIRSOC 601(2016).*

l_m: longitud del elemento de fijación dentro del miembro principal.

l_s: longitud del elemento de fijación dentro del miembro lateral.

R_a: Coeficiente de reducción.

R_e: F_{em}/F_{es}

R_t: l_m/l_s

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1 + R_e)}{R_e} + \frac{2F_{yb}(2 + R_e)D^2}{3F_{em}l_s^2}}$$

Extracción de Tabla 8.2.1.1-1 del INTI-CIRSOC 601 (2016).

A los efectos de obtener un valor de resistencia a la rotura el coeficiente de reducción se considera $R_d = 1$ lo cual permite una comparación directa con los valores experimentales.

La *Tabla 5.6* muestra los resultados obtenidos de las expresiones de la *Tabla 5.5* utilizando las tensiones propuestas en el Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016). Los valores alcanzados para las uniones paralelas y perpendiculares fueron iguales ya que las

tensiones utilizadas fueron las mismas, según los especifica la reglamentación. Para uniones con 6 clavos el valor fue de 4758 N y para uniones con 9 clavos el valor fue 7137 N. Se puede apreciar que el valor obtenido para la rotura corresponde al modo IV. En la *Figura 5.7* se grafican los resultados a los efectos de poder apreciar la diferencia entre cada modo de rotura y el menor valor correspondiente al modo de rotura IV.

Tabla 5.6: Resistencias teóricas de rotura de uniones múltiples con resistencias al aplastamiento F_c .

Resistencia teórica de rotura Z					
Parámetro	Unidad	Unión paralela		Unión perpendicular	
Nº de clavos	n	6	9	6	9
Modo rotura					
Im	N	6.563	9.844	6.563	9.844
Is	N	26.250	39.375	26.250	39.375
IIIs	N	9.176	13.764	9.176	13.764
IV	N	4.758	7.137	4.758	7.137

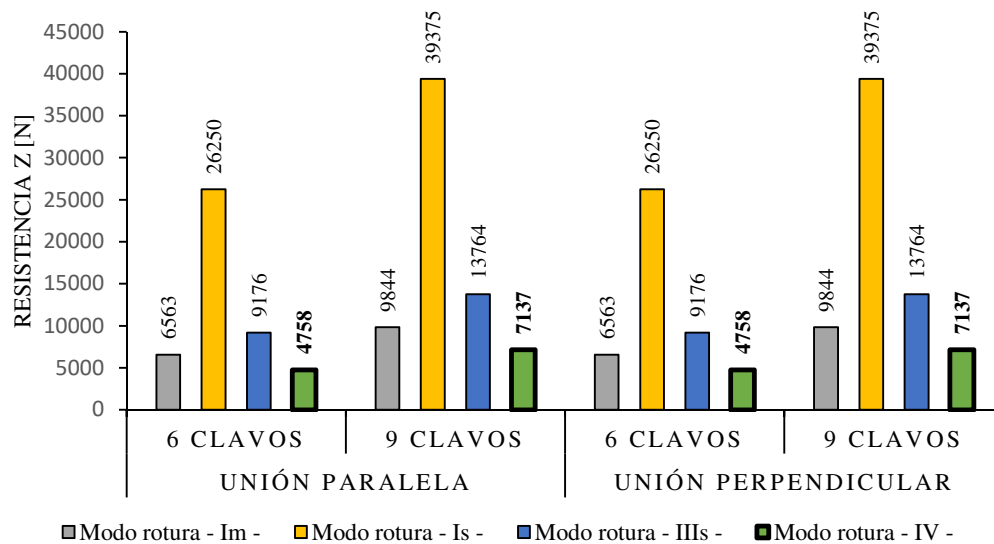


Figura 5.7: Resistencias teóricas de rotura de uniones múltiples con resistencias al aplastamiento F_c .

La *Tabla 5.7* muestra los resultados obtenidos de las expresiones de la *Tabla 5.5* utilizando las tensiones experimentales de Manavella *et al.* 2017. Los valores alcanzados en uniones paralelas con 6 y 9 clavos fueron de 4273 N y 6409 N respectivamente y en uniones perpendiculares fue de 3865 N y 5797 N. Se puede apreciar que el valor obtenido para la rotura corresponde al modo IV. En la *Figura 5.8* se grafican los resultados a los efectos de poder apreciar la diferencia entre cada modo de rotura y el menor valor correspondiente al modo de rotura IV.

Tabla 5.7: Resistencias teóricas de rotura de uniones múltiples con resistencias al aplastamiento F_E .

Resistencia teórica de diseño Z							
Parámetro	Unidad	Unión paralela		Unión perpendicular			
		Nº de clavos	n	6	9	6	9
Modo de Rotura							
Im	N			5.291	7.937	36.64	5.496
Is	N			21.165	31.748	21.165	31.748
IIIs	N			7.480	11.220	6.975	10.463
IV	N			4.273	6.409	3.865	5.797

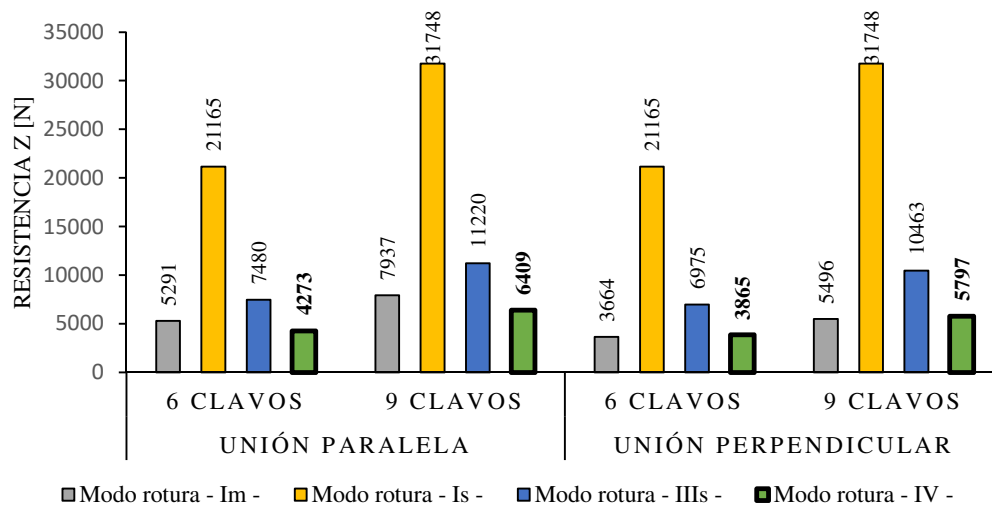


Figura 5.8: Resistencias teóricas de rotura de uniones múltiples con resistencias al aplastamiento F_E .

Como era de esperar los resultados determinados con las tensiones de aplastamiento de referencia F_E son menores a los determinados con las tensiones de aplastamiento de referencia F_C . Esta circunstancia en un primer análisis mostraría que utilizar los valores de tensión de aplastamiento F_C para determinar la resistencia de rotura de una unión clavada de álamo sobredimensiona su capacidad quedando del lado de la inseguridad. Es decir, por ejemplo, que para uniones paralelas con 6 clavos según las tensiones F_C los resultados muestran una carga de rotura de 4758 N mientras que según las tensiones F_E la carga de rotura sería de 4273 N inferior en un 11%. En general las resistencias con los valores de tensión experimentales resultan un 11%, 11%, 23% y 23% menores que las resistencias con los valores de tensiones del INTI-CIRSOC 601 (2016), para uniones paralelas con 6 clavos, paralelas con 9 clavos, perpendiculares con 6 clavos y perpendiculares con 9 clavos respectivamente.

Las menores cargas de rotura se obtuvieron para el modo de rotura IV que se condice con la formación de 4 rótulas plásticas, Ver *Tabla 5.6*, *Tabla 5.7*, *Figura 5.7* y *Figura 5.8* y descripción de los modos de rotura de la *Figura 5.5*.

En las resistencias calculadas mediante las tensiones F_E se mantiene la tendencia ya vista experimentalmente donde las uniones paralelas resisten notablemente más que las perpendiculares. En este caso los valores en uniones paralelas son un 49% superiores que en uniones perpendiculares.

5.3. COMPARACIÓN ENTRE LAS RESISTENCIAS EXPERIMENTALES Y LAS DETERMINADAS MEDIANTE INTI-CIRSOC 601 (2016).

A los fines de una comparación global la *Tabla 5.8* muestra los resultados teóricos de resistencia a la rotura obtenidos mediante las tensiones de aplastamiento proporcionados por el Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) y los obtenidos con las tensiones experimentales. También se incluyen los resultados de resistencias de rotura obtenidos experimentalmente divididos por el coeficiente $C_d = 1.6$ de duración de carga a los fines de obtener valores correspondientes a una duración de la carga de 10 años que sean comparables con los teóricos calculados previamente. Con el objetivo de obtener un

coeficiente de relación entre los valores experimentales y los obtenidos mediante la reglamentación se realiza el cociente entre ellos para cada tipo dirección y cantidad de clavos tal como se muestra en el final de la tabla. En la *Figura 5.9* se muestran los valores de resistencia antes mencionados para reflejar más claramente la superioridad de los resultados experimentales.

Tabla 5.8: Comparaciones entre resistencias de rotura de uniones múltiples para una duración de carga de 10 años.

Comparaciones entre resistencias de rotura.					
Parámetro	Unidad	Unión paralela		Unión perpendicular	
Nº Clavos	n	6	9	6	9
$Z (F_C)$ (1)	N	4.758	7.137	4.758	7.137
$Z (F_E)$	N	4.273	6.409	3.664	5.496
$Z (exp) \text{ min.}$ (2)	N	9.288	13.700	5.081	8.313
Relación entre (1) y (2)		1,95	1,92	1,07	1,16

$Z (F_C)$: Resistencia teórica de rotura calculada mediante resistencia al aplastamiento F_C obtenida del Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016). $Z (F_E)$: Resistencia teórica de rotura calculada mediante resistencia al aplastamiento F_E experimentales extraída de Manavella et al 2017. $Z (exp) \text{ min.}$: Valores mínimos de resistencia de rotura obtenidos experimentalmente.

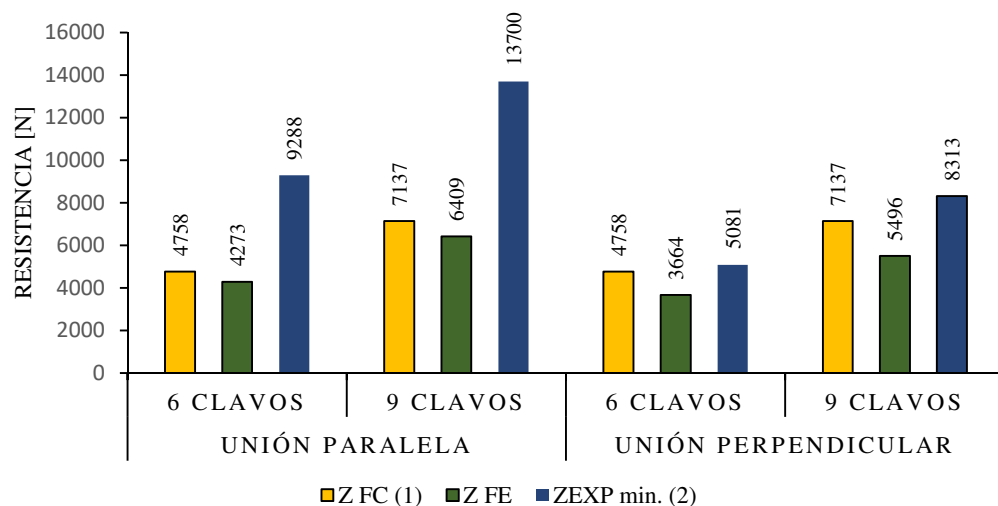


Figura 5.9: Comparaciones entre resistencias de rotura de uniones múltiples para una duración de carga de 10 años.

Como ya se mencionó anteriormente se observa que valores teóricos de resistencia a la rotura $Z(F_E)$ son menores que los valores de resistencia a la rotura $Z(F_C)$, debido a que los primeros fueron obtenidos con valores de tensión de aplastamiento de referencia menores. En este primer análisis queda de manifiesto que la estimación de las tensiones de referencia propuesta por el Reglamento INTI-CIRSCO 601 (2016) puede afectar el diseño de las conexiones múltiples, colocando a las mismas del lado de la inseguridad estructural.

Ahora bien, en un segundo análisis al comparar las resistencias teóricas a la rotura $Z(F_C)$ con los valores experimentales mínimos $Z(exp)_{min}$ se observa que estos superan a los valores teóricos. En uniones paralelas los resultados experimentales superan a los teóricos $Z(F_C)$ en un 195% y 192% para uniones paralelas con 6 y 9 clavos respectivamente y en uniones perpendiculares en un 107% y 116% para uniones con 6 y 9 clavos respectivamente. Si bien los resultados obtenidos mediante el reglamento son valores característicos correspondientes al percentil del 5%, en este caso se utilizan valores mínimos debido al bajo número de la muestra, poniendo los resultados aún más del lado de la seguridad.

A los fines de obtener un coeficiente de relación entre los valores encontrados experimentalmente y los valores arrojados por las expresiones del reglamento, se plantea la relación entre $Z(F_C)$ y $Z(exp)_{min}$. Los coeficientes encontrados son 1,95; 1,92; 1,07 y 1,16 para uniones paralelas con 6 clavos, paralelas con 9 clavos, perpendiculares con 6 clavos y perpendiculares con 9 clavos respectivamente. Del análisis se puede decir que para las uniones paralelas el reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) arroja valores conservadores ya que las expresiones no son capaces de reflejar las elevadas resistencias experimentales lo que afirma un sobredimensionado en las uniones. En el caso de las uniones perpendiculares las relaciones son próximas a 1 lo cual indica que las expresiones de cálculo reflejan el comportamiento para esta dirección.

Estos resultados se encuentran en línea con los expuestos en la tesis doctoral de Sosa Zito (2015) para la madera de *Eucalyptus grandis* donde las resistencias al aplastamiento de referencia obtenidas mediante el INTI-CIRSOC 601 (2016) resultaron un 47% superiores a las obtenidas experimentalmente para diámetros menores a 6,35 mm y los

valores de resistencia de las uniones múltiples con clavos de pequeño diámetro para la dirección paralela obtenidos mediante la reglamentación solo alcanzaron el 47% de los encontrados experimentalmente con una relación de 2,12.

CONCLUSIONES

6.1. EN RELACIÓN A LA RESISTENCIA EXPERIMENTALES DE ROTURA DE LAS UNIONES.

Al analizar uniones con la misma cantidad de clavos se observó que las uniones paralelas alcanzaron valores experimentales de resistencia de rotura mayores que las perpendiculares. En uniones con 6 clavos las paralelas superaron en un 64% a las perpendiculares con valores medios de 17.754 N y 10.793 N respectivamente mientras que en uniones con 9 clavos las paralelas superaron a las perpendiculares en un 46% con valores medios de 24.331 N y 16.604 N respectivamente.

Además, se verificó que en las uniones paralelas el valor máximo de resistencia fue alcanzado debido al desplazamiento máximo permitido por la norma de 15 mm mientras los valores máximos de tensión en las uniones perpendiculares se alcanzaron al 35% de ese límite establecido con un desplazamiento promedio aproximado de 4mm.

6.2. EN RELACIÓN AL INCREMENTO DE RESISTENCIA EN FUNCIÓN DEL NUMERO DE CLAVOS.

Al aumentar la cantidad de fijaciones en un 50% es decir de 6 clavos a 9 clavos y respetando el espaciamiento mínimo estipulado en la reglamentación argentina se observó que en las uniones paralelas la resistencia de rotura no se mantuvo proporcional, sino que fue menor con un aumento del 37% con valores medios de 17.754 N y 24.331 N para 6 y 9 clavos respectivamente mientras que en las uniones perpendiculares si se mantuvo la proporcionalidad con un aumento del 53% y valores de 10.793 N y 16.604 N para 6 y 9 clavos respectivamente.

Esto indicaría que en el caso de las uniones paralelas separaciones adoptadas no permitieron un total desempeño de los elementos de fijación a diferencia de las uniones perpendiculares donde la distribución fue eficiente.

6.3. EN RELACIÓN A LOS VALORES OBTENIDOS MEDIANTE EL REGLAMENTO INTI-CIRSOC 601 (2016).

Las muestras paralelas mostraron un deslizamiento de la punta del clavo hacia el interior de la madera impidiendo la formación total de la rótula plástica en ese extremo. Este fenómeno también se puede apreciar en las uniones perpendiculares, pero con menor notoriedad debido a su menor deslizamiento. (Ver *Figura 5.5*)

Este modo de rotura experimental condice con el modo de rotura IV obtenido en forma teórica mediante las expresiones del INTI-CIRSOC 601 (2016) el cual presenta la formación de 4 rótulas plásticas y el aplastamiento de la madera en todos los miembros.

Los valores de resistencia de rotura obtenidos con las tensiones experimentales F_E resultaron inferiores a los calculados con las tensiones del reglamento argentino F_C lo cual muestra que la reglamentación sobredimensiona la capacidad de las uniones poniendo a las mismas del lado de la inseguridad. Las resistencias de rotura con las tensiones experimentales resultaron un 11% y un 23% menores que las calculadas con las tensiones reglamentarias para uniones paralelas y perpendiculares respectivamente. En el caso de las resistencias de rotura con tensiones experimentales se mantiene la tendencia encontrada en los ensayos donde las uniones paralelas presentan valores un 49% superiores que las perpendiculares.

6.4. EN RELACIÓN A LA COMPARACIÓN DE LOS VALORES TEÓRICOS CON LOS EXPERIMENTALES.

Se encontró que los resultados de resistencia experimentales superaron a los obtenidos mediante el reglamento INTI-CIRSOC 601(2016)

En las uniones paralelas se obtuvo un coeficiente de relación de 1,95 y 1,92 para uniones con 6 y 9 clavos respectivamente lo cual indica que el reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016) arroja valores conservadores de resistencia a la rotura. Las expresiones de cálculo son incapaces de reflejar las elevadas resistencias experimentales obtenidas y sobredimensionan las uniones.

En las uniones perpendiculares se obtuvo un coeficiente de relación de 1,07 y 1,16 para uniones con 6 y 9 clavos respectivamente. Para este caso los valores teóricos son muy próximos a los experimentales mostrando que las expresiones reflejan en mayor medida el comportamiento en esta dirección.

6.5. FUTURAS INVESTIGACIONES.

Debido a la incapacidad de las expresiones del INTI-CIRSOC 601 (2016) para reflejar las elevadas resistencias de las uniones múltiples clavadas en la dirección paralela, resulta interesante trabajar en una muestra con un mayor número de probetas que permita estudiar con mayor detalle el comportamiento de las uniones. De esta forma sería posible aportar conocimientos con el fin de ajustar las expresiones de cálculo. Es importante también estudiar acerca de diferentes distribuciones y distancias mínimas para los elementos de fijaciones con el objetivo de obtener configuraciones que arrojen mejores desempeños en las uniones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Argüelles Álvarez R., Arriaga Martitegui F., Martínez Calleja J.J. (2000) Estructuras de Madera. Diseño y cálculo. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho. AITIM. 720 p.

Borodowski ED. 2006. Álamos y sauces en el Delta del Paraná: situación del sector y silvicultura. Jornadas de Salicáceas 2006.

CIRSOC 601. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad en Obras Civiles. (2016). Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Buenos Aires. (2016).

Cortizo S. 2005. Mejores árboles para más forestadores. Capítulo III Subprograma álamos en el Delta del Paraná. Pág. 137 a 160. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la Nación SAGPyA.

EN 1380 (2009) Timber structures. Test methods. Load bearing nails, screws, dowels and bolts. European Committee for Standardization, Brussels.

EN 26891 (1991) Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Principios generales para la determinación de las características de resistencia y deslizamiento. AENOR, Madrid.

EN 383 (2007) Timber structures. Test methods. Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. European Committee for Standardization, Brussels.

Filippetti, M.C.; Guillaumet, A.A.; Manavella, R.D.; Guillaumet, M.P. (2015). Uso estructural de la madera de álamo. II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Belo Horizonte, Brasil.

Guillaumet, A.A.; Filippetti, M.C.; Acuña Rello, L.; Piter, J.C. (2014b). Utilización de la madera de álamo en elementos estructurales. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay.

ISO 3130 (1975) Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.

ISO 3131 (1975) Wood. Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.

Johansen K.W. (1949) Theory of timber connections. International Association of Bridge and Structural Engineering. Publication 9: 249-262, Bern.

Johansson C.J. (1995) Glued-in bolts. Timber Engineering STEP 1, pp C14/1-C14/7. Centrum Hout, The Netherlands.

Manavella et al. (2017) Determinación de la resistencia al aplastamiento en madera de populus deltoides ‘australiano 129/60’, comparación con los valores dados por el circoc 601. II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera, Buenos Aires, Argentina.

Piter J. C. et al. (2014) Capacidad portante de uniones con clavos de pequeño diámetro. análisis comparativo de los resultados de ensayos con los calculados según las reglas de diseño del eurocódigo 5, del reglamento circoc 601 y de la norma nbr 7190. XIV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Natal, RN, Brasil.

Racher P. (1995) Mechanical timber joints- General. Timber Engineering STEP 1, pp C1/1- C1/10. Centrum Hout, The Netherlands.

Sosa Zitto, (2015) Determinación de la resistencia al aplastamiento en madera de populus deltoides ‘australiano 129/60’, comparación con los valores dados por el circoc 601, Tesis doctoral, Concepción del Uruguay, Argentina.

Tortorelli, Lucas A., Madera y Bosques Argentinos, 2da Edición, Buenos Aires, 2009, Tomo 1.

ANEXO I.

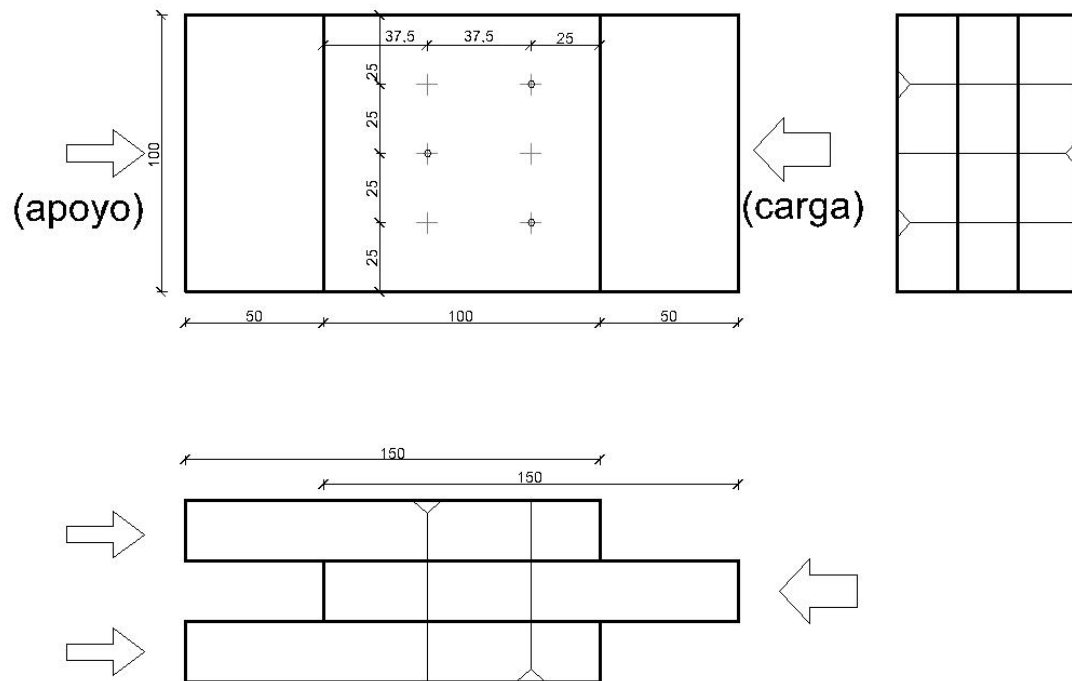


Figura II: Diseño de unión paralela con 6 clavos.

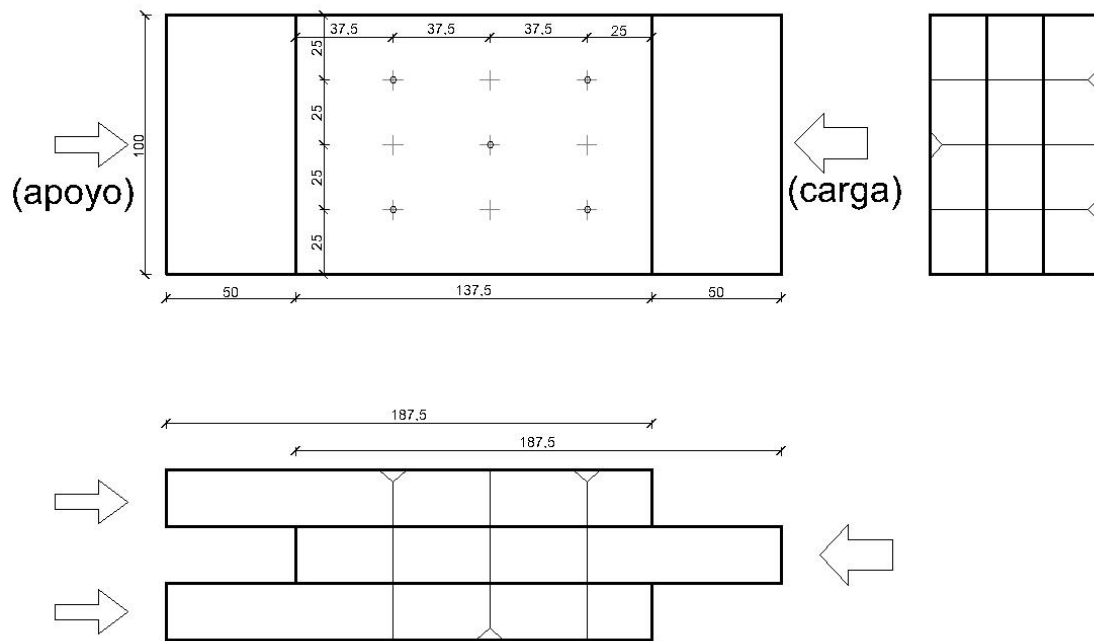


Figura I2: Diseño de unión paralela con 9 clavos.

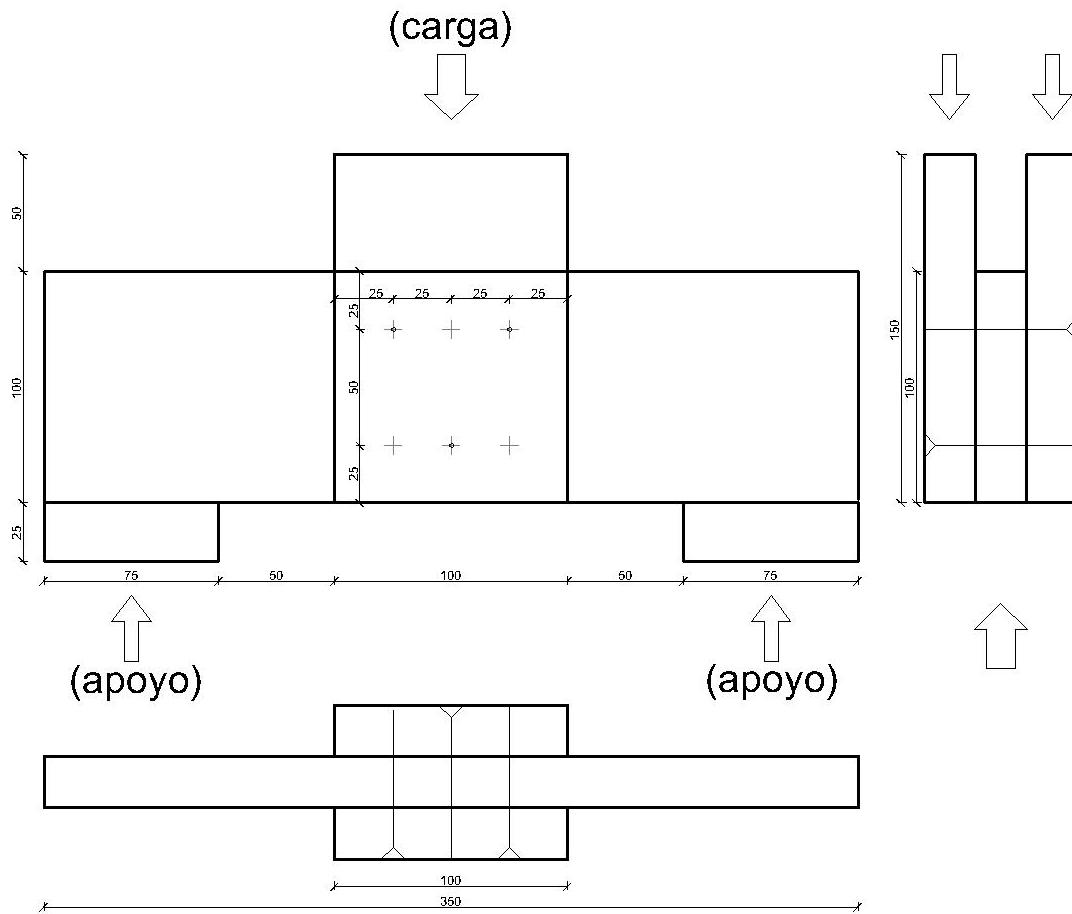


Figura 13: Diseño de unión perpendicular con 6 clavos.

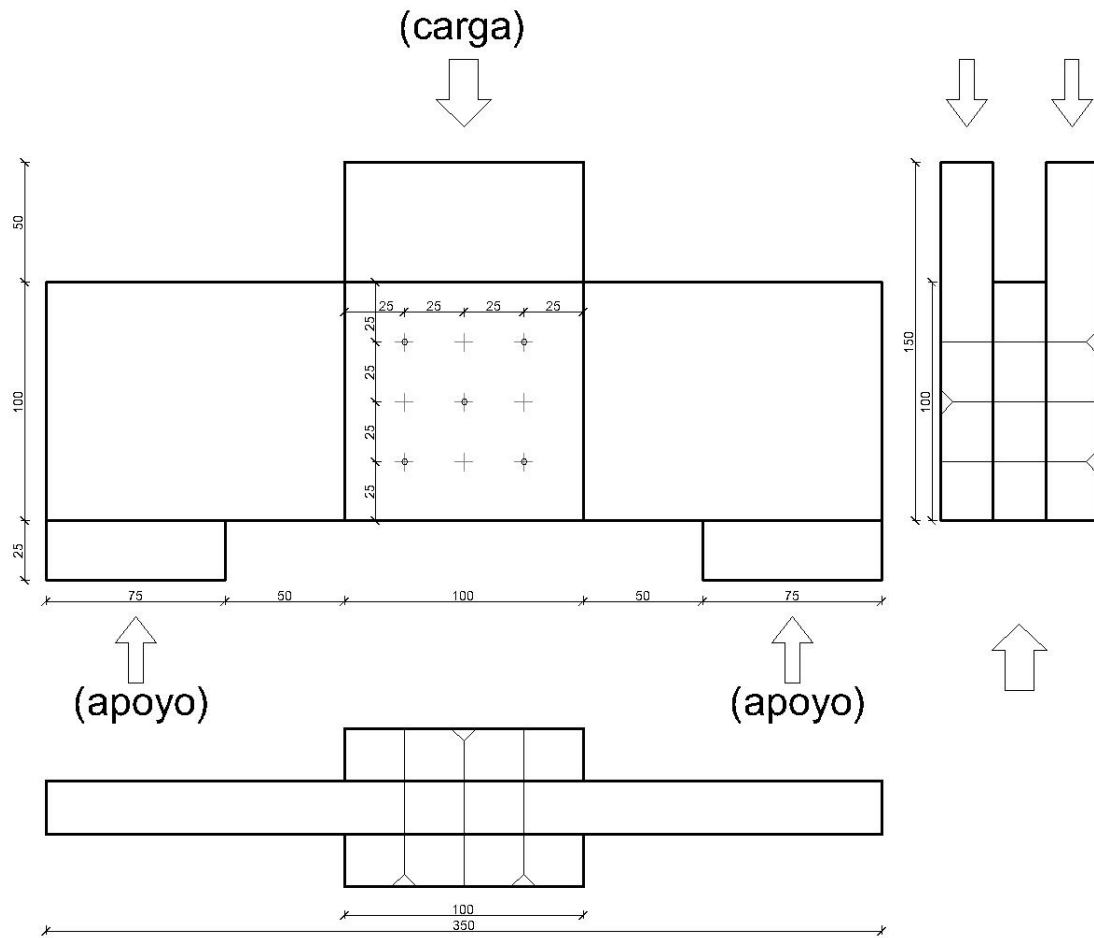


Figura I4: Diseño de unión perpendicular con 9 clavos.

ANEXO II.

Tabla III: Datos experimentales de los ensayos.

Probeta	Forma de Rotura		Carga máx. Kg	Desplazamiento				Tiempo min
	Despl.	Carga		Inicial 1 mm	Inicial 2 mm	Final 1 mm	Final 2 mm	
Pa6-01	x		1826	23,51	21,22	8,51	6,71	11:04:00
Pa6-02	x		1733	20,48	24,13	5,08	9,11	11:25:00
Pa6-03	x		1762	21,13	22,31	6,08	7,44	10:57:00
Pa6-04	x		1486	21,69	21,82	7	6,36	10:32:00
Pa6-05	x		1632	22,7	22,34	7,73	8,15	10:48:00
Pa6-06	x		1881	21,45	21,65	7,13	6,63	10:23:00
Pa6-07	x		1790	21,8	20,4	7,97	5,29	09:11:00
Pa6-08	x		1776	21,68	20,16	6,39	4,07	09:41:00
Pa6-09	x		1909	22,67	20,98	6,88	5,77	08:30:00
Pa6-10	x		1834	21,66	21,21	6,63	6,15	11:08:00
Pa6-11	x		1872	21,62	19,8	6,6	4,95	11:21:00
Pa6-12	x		1804	22,08	22,67	8,14	7,89	10:26:00
Pa9-01	x		2429	22,98	23,31	10,6	8,1	11:32:00
Pa9-02	x		2192	21,49	21,22	8,03	5,85	12:44:00
Pa9-03	x		2464	22,21	22,24	6,15	7,09	12:23:00
Pa9-04	x		2380	21,75	21,08	6,7	6,96	11:24:00
Pa9-05	x		2590	21,02	21,03	7,34	6,25	10:53:00
Pa9-06	x		2498	22,52	21,94	7,4	7,91	11:08:00
Pa9-07	x		2464	21,88	20,28	7,37	5,19	11:06:00
Pa9-08	x		2372	20,84	21,76	6,9	6,63	10:39:00
Pa9-09	x		2249	20,46	22,32	6,55	6,93	10:20:00
Pa9-10	x		2542	21,23	22,58	7,69	7,5	10:52:00
Pa9-11	x		2584	21,41	21,24	7,29	6,23	10:45:00
Pe6-01		x	1322	21,73	21,62	16,22	15,04	10:00:00
Pe6-02		x	888	22,7	24,98	19,29	20,71	07:14:00
Pe6-03		x	1059	24,73	20,92	19,5	16,76	07:38:00
Pe6-04		x	898	22,37	23,5	18,66	20,41	07:50:00
Pe6-05		x	964	22,49	22,27	19,02	19,22	10:40:00
Pe6-06		x	1512	25,22	25,09	15,29	14,99	12:26:00
Pe6-07		x	813	23,33	27,09	20,89	24,13	08:17:00
Pe6-08		x	1037	24,31	23,18	19,69	19,16	10:32:00
Pe6-09		x	1109	24,46	25,23	21,27	19,08	09:53:00
Pe6-10		x	1095	23,24	27,37	18,17	22,47	10:17:00
Pe6-11		x	1175	25,87	26,83	20,44	21,53	09:27:00

Pe9-01	x	1628	17,91	19,93	10,52	15,74	09:20:00
Pe9-02	x	1562	21,73	24,6	16,04	20,24	11:30:00
Pe9-03	x	1330	24,47	25,2	21,61	21,53	09:33:00
Pe9-04	x	1595	24,52	27,72	20,1	21,83	09:45:00
Pe9-05	x	1695	27,11	26,78	21,57	21,94	10:05:00
Pe9-06	x	1433	26,08	21,84	21,16	18,44	09:37:00
Pe9-07	x	1689	23,96	23,05	20,07	17,08	10:30:00
Pe9-08	x	1914	21,73	19,51	15,09	13,55	11:49:00
Pe9-09	x	1714	24,04	25,07	19,91	19,28	09:07:12
Pe9-10	x	1761	22,74	23,31	16,86	17,91	09:20:00
Pe9-11	x	1943	22,7	25,26	18,01	20,01	11:16:00

Tabla II2: Datos de cubicación para cada probeta.

Probetas	Cubicación											
	Dimensiones de las probetas											
	e1	e2	e3	e4	b1	b2	b3	b4	h1	h2	h3	h4
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Pa6-01	21,8	21,87	22,04	21,99	27,36	27,89	26,45	26,32	99,92	100,3	100,26	99,99
Pa6-02	22,3	22,25	22,46	22,61	32,91	33,21	34,12	34,25	100,42	100,04	100,15	100,31
Pa6-03	22,5	22,43	22,24	22,28	30,42	30,51	31,08	31,27	100,53	100,45	100,4	100,44
Pa6-04	22,38	22,34	21,96	22,03	28,56	28,77	29,07	28,31	101,04	101,14	101,04	100,49
Pa6-05	22,45	22,44	22,42	22,34	25,31	24,96	24,9	24,88	100,07	99,96	100,1	100,09
Pa6-06	22,28	22,28	22,18	22,2	27,83	28,08	27,9	28,2	100,29	100,17	100,27	100,24
Pa6-07	22,4	22,22	22,34	22,53	24,7	24,58	24,36	24,45	97,96	97,79	98	97,64
Pa6-08	22,37	22,38	22,27	22,27	25,21	25,42	25,66	25,66	99,68	99,76	99,78	99,55
Pa6-09	22,52	22,51	22,39	22,45	26,77	26,7	27,35	27,65	100,41	100,28	100	100,34
Pa6-10	22,25	22,21	22,3	22,28	20,08	20,24	20,55	20,47	100,08	99,96	99,85	99,91
Pa6-11	22,22	22,23	22,41	22,45	24,59	24,62	25,26	25,41	100,28	100,3	100,29	100,19
Pa6-12	22,31	22,34	22,43	22,58	26,18	26,23	26,05	25,79	100,36	100,3	100,31	100,3
Pa9-01	22,55	22,63	22,51	22,34	32,98	33,12	34,09	34,24	100,67	100,58	100,56	100,57
Pa9-02	22,06	22,14	22,33	22,34	32,22	32,11	32,64	32,95	101,09	101,4	101,2	101,03
Pa9-03	22,59	22,62	22,08	21,75	31,19	31,06	31,38	31,52	100,7	100,46	100,45	100,72
Pa9-04	22,23	22,24	22,41	22,45	32,63	32,59	32,83	32,93	101,14	100,43	100,87	101,11
Pa9-05	22,36	22,37	22,48	22,47	33,3	33,35	33,39	33,38	100,77	100,73	100,98	100,81
Pa9-06	22,38	22,36	22,07	22,09	33,52	33,58	33,76	34,12	100,89	101,1	100,99	100,92
Pa9-07	22,25	22,28	21,96	22,02	32,54	32,54	32,91	33,16	100,35	100,75	100,62	100,01
Pa9-08	22,23	22,2	22,27	22,29	33,37	33,46	33,11	33,12	101	101,03	101,76	101,16
Pa9-09	22,57	22,59	22,23	22,32	32	31,85	32,33	32,53	100,74	100,65	100,64	100,77
Pa9-10	21,88	21,86	22,32	22,35	32,73	33,11	33,54	33,29	101,14	101,1	101,29	100,82
Pa9-11	22,16	22,18	22,33	22,37	30,79	30,58	30,73	30,58	101,01	100,83	100,77	101,13
Pe6-01	22,41	22,64	22,4	22,58	49,38	49,67	48,6	48,57	122,88	122,75	122,76	123,36
Pe6-02	22,26	22,29	22,18	22,14	47,88	48,02	48,76	48,93	122,05	121,73	121,89	122,14
Pe6-03	22,59	22,25	22,35	22,55	46,58	46,55	46,96	47,06	120,69	120,27	120,57	120,43
Pe6-04	22,05	22,1	22,56	22,18	48,77	48,32	48,16	49,23	121,21	121,88	121,57	120,99
Pe6-05	23	23	22,68	22,64	47,82	48,22	48,2	48,19	120,22	120,1	119,3	119,36
Pe6-06	22,53	22,34	22,15	22,43	47,81	47,9	48,22	48,18	119,98	120,34	119,99	119,53
Pe6-07	22,46	22,3	22,29	22,38	48,06	48,15	48,65	48,94	123,06	123,29	123,16	123,01
Pe6-08	22,88	23,21	23,34	23,28	49,35	49,35	49,34	49,4	120,07	120,44	120,32	120,11
Pe6-09	22,51	22,75	22,93	23,08	45,6	45,75	45,88	45,74	120,34	120,91	120,09	119,6
Pe6-10	22,49	22,49	22,48	22,42	47,93	47,91	48,32	48,31	121,42	122,31	122,29	121,46
Pe6-11	22,41	22,34	22,35	22,46	48,53	48,9	49,21	49,07	120,35	120,78	120,37	120,09
Pe9-01	22,4	22,73	22,49	22,39	43,48	43,17	44,53	45,02	120,61	121,36	121,08	120,47
Pe9-02	22,45	22,55	22,4	22,35	47,3	47,96	47,3	46,86	121,34	121,78	121,67	121,22
Pe9-03	22,28	22,02	22,04	22,09	46,18	45,92	47,13	47,57	120,47	121,11	121,17	120,68

Pe9-04	22,39	22,08	22,21	22,45	46,06	46,73	46,61	47,04	122,43	122,63	122,05	121,77
Pe9-05	22,23	22,12	22,25	22,17	47,59	47,14	49,95	49,41	122,81	122,77	123,04	123
Pe9-06	22,3	22,26	22,34	22,19	48,12	47,62	48,61	48,09	121,11	121,16	120,88	120,87
Pe9-07	22,49	22,33	22,28	22,37	47,58	46,86	48,83	47,97	124,02	123,55	123,58	124,22
Pe9-08	22,4	22,39	22,2	22,36	46,41	46,44	46,94	47,08	121,27	121,04	120,83	120,9
Pe9-09	22,63	22,77	22,52	22,47	48,24	47,82	47,66	47,08	121,51	121,28	120,9	121,35
Pe9-10	22,17	22,2	22,33	22,41	47,45	47,81	48,18	48,55	123,16	122,96	122,48	123,05
Pe9-11	22,41	22,61	22,16	22,28	46,99	47,48	47,68	46,98	122,54	122,51	122,58	122,35

Tabla II2: Datos de pesada para cada probeta

Probetas	Pesos	
	peso húmedo	peso seco
	g	g
Pa6-01	28,6	26,2
Pa6-02	38,3	35,2
Pa6-03	28,6	26,1
Pa6-04	25,4	23,2
Pa6-05	22,1	20,2
Pa6-06	28,2	25,7
Pa6-07	28,1	25,8
Pa6-08	23,2	21,3
Pa6-09	27,9	25,6
Pa6-10	18,6	17,1
Pa6-11	23,3	21,4
Pa6-12	25,6	23,5
Pa9-01	32,5	30
Pa9-02	32,6	29,9
Pa9-03	30,4	28
Pa9-04	30,2	27,7
Pa9-05	32,6	29,8
Pa9-06	30,1	27,5
Pa9-07	27,5	25,2
Pa9-08	31,2	28,6
Pa9-09	28,8	26,5
Pa9-10	32,4	29,8
Pa9-11	27,6	25,4
Pe6-01	55,1	50
Pe6-02	50	45,6
Pe6-03	53,6	49
Pe6-04	52,1	47,7
Pe6-05	49,8	45,4
Pe6-06	54,7	49,9
Pe6-07	53,2	48,8
Pe6-08	52	47,6
Pe6-09	45,6	41,6
Pe6-10	54	49,2
Pe6-11	54,3	49,5
Pe9-01	46,1	42
Pe9-02	50,8	46,3
Pe9-03	51,6	47,2
Pe9-04	49,4	45,3

Pe9-05	54,8	50,1
Pe9-06	53,1	48,7
Pe9-07	55,6	50,7
Pe9-08	54,9	50,2
Pe9-09	50	45,6
Pe9-10	55,9	51,1
Pe9-11	59,3	54,1
