

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor patrocinante: Alexander Opazo Vega.

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TENSIÓN
DE FLUENCIA EN FLEXIÓN Y RESISTENCIA AL
APLASTAMIENTO DE TORNILLOS
AUTOPERFORANTES.**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el Título de Ingeniero
Civil

Juan Pablo Toro Somoza.

Concepción, marzo 2017.

NOMENCLATURA.

D: Diámetro nominal del medio de unión, mm.

D_h : Diámetro del hilo, mm.

FA: Factor de ajuste,

F_{ff} : Tensión de fluencia en el medio de unión, MPa.

F_{yb} : Tensión de fluencia en el acero, MPa.

M_y : Momento de fluencia, N*mm.

P: Carga de fluencia, N.

P_{el} : Capacidad de carga admisible, N.

R_{ap} : Resistencia al aplastamiento en la madera, MPa.

$R_{ap,c}$: Resistencia al aplastamiento del vástago de madero principal, MPa.

$R_{ap,l}$: Resistencia al aplastamiento del vástago de madero secundario, MPa.

$R_{ap,\theta}$: Resistencia al aplastamiento según ángulo de la carga respecto a la fibra de madera, MPa.

r_1 : Velocidad de aplicación de carga, mm/min.

S: Modulo de sección plástica, mm³.

S_{bp} : Separación entre apoyos, mm.

L: Longitud del tornillo autoperforante, mm.

l_c : Longitud de apoyo del pasador de la pieza principal, mm.

l_l : Longitud de apoyo del pasador de la pieza principal, mm.

Θ : Angulo entre la dirección de la sollicitación y la dirección de la fibra, °.

ρ_o : Densidad anhidra media de la especie forestal, kg/m

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TENSIÓN DE FLUENCIA EN FLEXIÓN Y RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO DE TORNILLOS AUTOPERFORANTES.

Juan Pablo Toro Somoza.

Departamento de ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

jutoro@alumnos.ubiobio.cl

Profesor patrocinante: Alexander Opazo Vega.

Departamento de ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

aopazove@ubiobio.cl

Resumen

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar experimentalmente la resistencia al aplastamiento de la madera y la tensión de fluencia en flexión de tornillos autoperforantes mediante los ensayos ASTM D5764 y ASTM F1575. Parámetros preponderantes en la resistencia en conexiones de madera sometidas a extracción lateral. Para la caracterización de la resistencia al aplastamiento se evaluó la incidencia de tres factores: Diámetro del tornillo autoperforante, Densidad de la madera y dirección de carga respecto a la fibra. Para ello se ensayaron probetas de dos especies de madera, con tornillos de tres diámetros diferentes, en condiciones carga perpendicular y paralelo a la fibra de madera. Para la caracterización de la tensión de fluencia en flexión se consideró el diámetro como único factor, realizando el ensayo a tres diámetros diferentes. Los resultados experimentales fueron contrastados con los criterios de diseño de la normativa NCh 1198. Los resultados experimentales demuestran que los tornillos autoperforantes desarrolla una tensión de fluencia a flexión entre un 25% a 30% mayor a la designada por la normativa NCh1198, desarrollando una relación inversamente proporcional al diámetro de los tornillos. Los resultados experimentales para la resistencia al aplastamiento fueron entre 53% a 76% menores a los normativos, desarrollando una una resistencia mayor en condiciones de carga paralela y una relación directamente proporcional para el diámetro y la densidad de madera. Palabras Clave: Conexiones, tornillos autoperforantes, madera

11.217 palabras Texto + 19 Figuras/Tablas * 250 = 15917 Palabras Totales

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE PARAMETERS F_{ff} AND R_{ap}--
STIPULATED IN THE NORMA NCh 1198 FOR WOOD CONNECTION MADE
WITH SELF-TAPPING SCREW**

Juan Pablo Toro Somoza.

Department Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

Jutoro@alumnos.ubiobio.cl

Professor guide: Alexander Opazo Vega.

Department Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

aopazove@ubiobio.cl

Abstract

The object of the following research was to experimentally evaluate the dowel-bearing strength and the bending yield moment of self-tapping screws by the standards ASTM D5764 and ASTM F1575. Predominant parameters in wood joint resistance exposed to lateral extraction. For the characterization of the dowel-bearing strength, the incidence of three factors gets evaluated: Diameter of the self-tapping screws, wood density and direction of the load relative to the wood grain. For it, test tubes with two different wood species were evaluated, using three different screw diameters, with perpendicular load conditions and parallel to the wood grain. For the characterization of the bending yield moment in flexion the diameter was the only factor considered, making test with three different diameters. The experimental results were contrasted with the design criteria specified on the NCh 1198 normative. The experimental results shows that the self-tapping screws develops a bending yield moment between 25% to 30% greater to the specified on the NCh 1198 normative, developing a inversely proportional relation to the diameter of the screws. The experimental results for the dowel-bearing strength were between 53% to 76% less to the ones showed on the normative, developing a greater resistance in parallel load conditions and a directly proportional relation for the diameter and wood density.

Keywords: Connections, Screw, Wood.

Contenido.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo General.....	6
1.2.2 Objetivos Específicos.	6
1.3 Metodología.....	6
1.3.1 Recopilación y revisión de material bibliográfico.	7
1.3.2 Diseño de la investigación.	7
1.3.3 Desarrollo experimental.....	7
1.3.4 Resultados y análisis estadístico.....	7
1.3.5 Conclusiones.....	7
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.	8
2.1 Introducción.....	8
2.2 Madera un material estructural.	8
2.2.1 Estructura anatómica de la madera.	9
a) Estructura microscópica.....	9
b) Estructura macroscópica.....	9
2.2.2 Propiedades Físicas.....	10
2.2.3 Propiedades mecánicas.	12
a) Tracción y compresión paralelo a la fibra.....	12
b) Tracción y compresión perpendicular a la fibra.	13
c) Flexión.	14
d) Cizalle.....	14
2.2.4 Factores que inciden en las propiedades físicas y mecánicas en la madera.....	14
a) Factores dentro del proceso de producción.....	14
2.3 Conexiones en madera estructural.....	16
2.3.1 Uniones mecánicas con elementos de tipo clavija.....	17
2.3.2 Antecedentes y estado de la investigación en uniones tipo clavija.....	19
2.3.3 Modos de falla y capacidad portante.	23
2.3.4 Resistencia al aplastamiento Rap.....	27
2.3.5 Tensión de fluencia de los medios de unión Fff.....	29
Capítulo 3 Programa experimental.....	30
3.1 Materiales.....	31

3.1.1 Tornillo auto perforante.	31
3.14 Maquinaria e instrumentación.....	32
3.2 Generalidades del ensayo “Tensión de fluencia en el acero”.	32
3.2.1 Tensión de fluencia en el acero Fyb	33
3.3 Generalidades del ensayo “Resistencia de aplastamiento en la madera”.	35
3.3.1 Probetas de ensayo.	36
3.3.2 Resistencia al aplastamiento R_{ap}	36
Capítulo 4: Presentación y análisis de resultados.	36
4.1 Tensión de fluencia en tornillos auto-perforantes.....	37
4.2 Resistencia al aplastamiento bajo la acción de tornillos auto-perforantes.....	39
4.2.1 Influencia del diámetro en la resistencia al aplastamiento.....	41
4.2.2 Influencia de la dirección de la carga en la resistencia al aplastamiento.	42
4.2.3 Influencia de la densidad en la resistencia al aplastamiento.	42
Capítulo 5: Conclusiones.....	43
5.1 Futuras investigaciones.....	45
Bibliografía.....	47

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.

Las construcciones de madera representan una gran belleza arquitectónica siendo una alternativa económicamente competitiva respecto a otros materiales de construcción, pero por sobre todo supone una vía de construcción sustentable. Respondiendo así, a la demanda mundial por cuidado del medio ambiente y uso de energías renovables.

En Chile el sector de la construcción está dentro de los 3 sectores con mayor emisión de gases de efecto invernadero, siendo el responsable del 33% de los gases emitidos a nivel nacional. Esta cifra se ve reflejada en la baja utilización de la madera para fines constructivos, con tan solo un 12 %, muy alejados de potencias como Canadá y Estados Unidos donde el uso de la madera llega al 90% .Es por esto que nuestra responsabilidad como ingenieros conscientes con el medio ambiente y partícipes de un mundo globalizado, es promover la construcción de edificaciones que generen valor al mejorar la calidad de vida de las personas equilibrando los aspectos sociales, económicos y medioambientales.

Hoy en día Chile se posiciona dentro de los 11 mayores productores de madera a nivel mundial, de la cual más del 70 % es exportada. Uno de los factores involucrados en dichas cifras es la escasa demanda de la madera a nivel nacional como material de construcción. La baja demanda de madera en el área de la construcción es un problema latente, es por esto que se están implementando programas liderados por la CORFO y proyectos de investigación para aportar al posicionamiento de la madera como material de construcción.

Una de las formas de incentivar el uso de la madera, es fortaleciendo y actualizando nuestro marco normativo, mediante proyectos de investigación y ensayos experimentales. Es por esto que la idea de esta tesis es realizar una evaluación a los criterios adoptados por la normativa NCh 1198 en su actualización del año 2006, para el cálculo de la resistencia al aplastamiento de la madera y la tensión de fluencia en el acero en tornillos autopeforantes, parámetros referentes a la estimación de la carga admisible de extracción lateral para conexiones de madera.

En las edificaciones de madera los sistemas de conexión tipo clavija (clavos, bulones, pasadores, tornillos, grapas) constituyen el principal grupo de conexiones mecánicas. El costo de las uniones es en general elevado, siendo frecuente que el conjunto de los elementos de conexión y sus operaciones anexas constituyan entre el 20 y 25%, lo que, además supone

una gran dedicación de tiempo en su construcción. Dentro de los sistemas de conexión tipo clavija están los tornillos autoperforantes, los cuales gracias a su hilo y tipo de punta permiten conectar piezas sin necesidad de una perforación previa, permitiendo así, realizar los cuatro pasos para fijar piezas en una sola operación: perfora, rosca, fija y aprieta. Dicha propiedad le permite confeccionar conexiones en un menor tiempo respecto a las otras alternativas, otorgando una gran ventaja a nivel constructivo. La combinación de la caña lisa y roscada en conjunto con el uso de acero templado permiten que estos se puedan cargar en corte y tensión, o una combinación de ambos. Durante la fabricación, su hilo es endurecido, dando lugar a una mayor capacidad de flexión y torsión, pero también a un mecanismo de rotura más frágil.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo General.

Evaluar experimentalmente la tensión de fluencia en flexión y resistencia al aplastamiento para conexiones de madera elaborados con tornillos autoperforantes.

1.2.2 Objetivos Específicos.

1. Realizar un estado al arte respecto a la teoría en el diseño de conexiones de madera confeccionadas con elementos de conexión tipo clavija, sometidas a extracción lateral.
2. Realizar ensayos de tensión de fluencia en flexión en tornillos autoperforantes mediante el ensayo ASTM F1575.
3. Realizar ensayos de resistencia al aplastamiento en la madera mediante el ensayo ASTM D5764, en conexiones de madera confeccionadas con tornillos autoperforantes.
4. Analizar estadísticamente los resultados obtenidos en los ensayos ASTM F1575 y ASTM D5764.
5. Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con el criterio de diseño estipulado en la normativa NCh 1198.

1.3 Metodología.

Para desarrollar de forma satisfactoria y cumplir con los objetivos previamente planteados, el proyecto de investigación se dividió en las siguientes etapas.

1.3.1 Recopilación y revisión de material bibliográfico.

En esta etapa se desarrollará una investigación sobre la teoría empleada para el cálculo de la capacidad portante en conexiones de madera elaboradas con sistemas de fijación tipo clavija, sometidas a extracción lateral. Enfatizando el estudio en el comportamiento estructural de la madera y los tornillos autoperforantes como elementos de unión. Siguiendo con la línea de investigación anterior, se hará una revisión exhaustiva de los criterios de diseño de la normativa nacional e internacional. Así como también, se investigarán los ensayos normalizados que permiten determinar los parámetros de tensión de fluencia en flexión y resistencia al aplastamiento de tornillos autoperforantes.

1.3.2 Diseño de la investigación.

En base a la recopilación y estudio del material bibliográfico, se procederá a definir el enfoque de la investigación. Se determinarán los ensayos a realizar y la viabilidad de su ejecución. Conforme a lo anterior, en base a la teoría estudiada y a los criterios de diseño de la normativa NCh1198, se definirán las variables en estudio y la formulación de hipótesis.

1.3.3 Desarrollo experimental.

Dentro del desarrollo experimental se implementará el equipamiento e instrumentación necesaria para el desarrollo de los ensayos a realizar. Se confeccionarán las probetas de ensayo, para finalmente iniciar el desarrollo de los experimentos.

1.3.4 Resultados y análisis estadístico.

A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo experimental se procederá calcular las variables tensión de fluencia en flexión y resistencia al aplastamiento. Posteriormente se realizará un análisis estadístico para la estimación y correlación de las variables en estudio. Finalmente se generará un contraste entre resultados obtenidos experimentalmente y los estipulados en la normativa NCh 1198.

1.3.5 Conclusiones.

A partir de los resultados y su respectivo análisis, surgirán las principales ideas concluyentes que dan respuesta a los objetivos planteados en el proyecto de investigación.

Complementariamente a las conclusiones, se presentarán los futuros estudios pertinentes para continuar el avance del conocimiento sobre la temática abordada

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.

2.1 Introducción.

En el presente capítulo se expone el material teórico y experimental, respecto a la madera y medios de unión tipo clavija. En primera instancia en el apartado 2.2 se presenta: “Madera un material estructural”. El cual inicia con una breve descripción de la composición biológica de la madera y profundiza en su estructura tanto microscópica como macroscópica. Luego se hará énfasis en sus propiedades: físicas y mecánicas.

Posteriormente en el apartado 2.3 se hace un estudio sobre sistemas de unión tipo clavija que vinculan piezas de madera, partiendo por una recopilación de los distintos estudios que han permitido la evolución de este sistema de fijación. Se identificarán las corrientes de investigación más relevantes en la estimación de la capacidad portante y como a través de estas se han adoptado en reglas de diseños.

2.2 Madera un material estructural.

Para utilización de la madera como un material estructural, es necesario atender los distintos factores que le confieren características singulares respecto a otros materiales de construcción como el acero y el hormigón. La madera es un material complejo debido a que presenta propiedades tales como: La anisotropía, higroscopia, deformaciones diferenciadas en el tiempo, lo que, en conjunto con variables como su origen, presencia de singularidades o defectos; permiten caracterizar sus propiedades mecánicas que definen su desempeño en conexiones. Existe una gran variabilidad en las propiedades físicas en la madera: Entre distintas especies, región de cultivo, entre árboles, dentro de un mismo árbol y de una sección transversal (Coronel, 1994).

2.2.1 Estructura anatómica de la madera.

a) Estructura microscópica.

La madera es un material orgánico formado por una red de tubos pegados entre sí, orientados axial o longitudinalmente. Los tubos llamados células o fibras además de transportar sustancias, le confieren la singularidad de tener una baja densidad y una alta resistencia a la compresión y tracción. La fibra está compuesta por 3 elementos principales: Celulosa, hemicelulosa y lignina. Esta última forma la pared intercelular que une las fibras entre sí, teniendo como función engrosar el tallo y proporcionar rigidez a la pared celular. La pared está formada por diversas capas, las cuales presentan una red de microfibrillas orientadas en su mayoría longitudinalmente, mientras que en una menor cantidad presenta una inclinación entre 50° y 70°. Esta organización resulta muy eficaz para soportar las tensiones que recibe el árbol en vida, ya que las solicitaciones de mayor relevancia (debidas a la flexión originada por el viento) son tensiones axiales, parte de tracción y parte de compresión, que se distribuyen casi linealmente (ARGÜELLES 2009). La distribución de las microfibrillas, dispuestas en distintas direcciones en la pared celular, es una de las causas del comportamiento anisotrópico en la madera.

A partir de la configuración en la estructura celular, se puede clasificar las especies forestales en dos grupos: Coníferas y Latifoliadas.

b) Estructura macroscópica.

La anatomía del árbol se puede dividir en distintas zonas, las cuales se puede apreciar haciendo un corte trasversal al tronco. A continuación, en la figura 2.1 se presentan las distintas partes que componen al tronco.

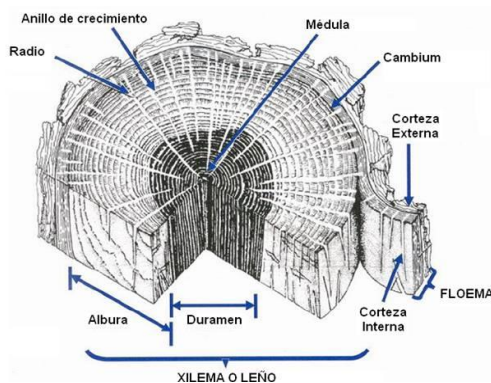


Figura 2.1. Anatomía macroscópica del tronco

- **Corteza:** La corteza se ubica en la parte exterior del tronco, formada por materia muerta protectora frente a agentes atmosféricos.
- **Cambium:** zona formada principalmente por células embriatorias. Estas células generan cada año dos capas de células adultas: Xilema y folema. El folema tiene como función el transporte y almacenamiento de nutrientes el cual posteriormente deja de funcionar pasando a ser parte de la corteza. El xilema, por su parte, es el encargado de dar resistencia al árbol formando los anillos de crecimiento hacia el interior del tronco.
- **Anillos de crecimiento:** Son la madera o leño formado por el xilema, su composición está determinada según la época del año en que es creada, generando así la denominada madera temprana y tardía. La madera tardía posee una pared celular de mayor espesor que la madera temprana, confiriéndole una mayor resistencia. Los anillos de crecimiento dan origen a dos zonas: La albura y duramen.

2.2.2 Propiedades Físicas.

Las principales propiedades físicas de la madera son: La anisotropía, higroscopia, densidad e hinchazón o merma.

Anisotropía: Cualidad intrínseca de la materia. La cual supone una variación en las propiedades físicas y mecánicas, dependiendo de la dirección en que esta se evalúe. Debido a la estructura microscópica y macroscópica la madera es fuertemente heterogénea y anisótropa. Lo cual motiva que las propiedades se deban analizar según tres direcciones principales: Longitudinal, radial y tangencial (Coronel, 1994; Hoffmeyer, 1995).

- **Axial o longitudinal:** Eje paralelo a la dirección de la fibra y por ende al eje longitudinal del tronco.
- **Radial:** Eje perpendicular a los anillos de crecimiento y al eje longitudinal
- **Tangencial:** Eje tangencial a los anillos de crecimiento y perpendicular a los otros dos ejes.

En el cálculo de su comportamiento estructural esto se simplifica a dos direcciones: Paralelo y perpendicular. La dirección perpendicular engloba las direcciones de simetría radial y tangencial, debido a la baja variación que presenta en sus esfuerzos. Para tener una

estimación del comportamiento, la madera resiste entre 20 a 200 veces más en sentido paralelo a la fibra que en el perpendicular (Fritz, 2004).

Higroscopia: Es la propiedad inherente a la madera la cual, le permite absorber o liberar humedad dependiendo principalmente de las condiciones ambientales en que se encuentra (humedad y temperatura). El contenido de humedad, correspondiente al punto de saturación de las fibras, se sitúa, para la mayoría de las especies, entre el 25% y el 35%. Siendo el valor de 28% suficientemente aproximado para los fines prácticos (Hoffmeyer 1995). Cualquier disminución de humedad por debajo de este punto es extraída de la pared celular. Por consiguiente, producirá una disminución en sus dimensiones, así como un aumento en las propiedades mecánicas de la madera. En la figura 2.2 se presenta un gráfico que relaciona la resistencia con el porcentaje de humedad en la madera.

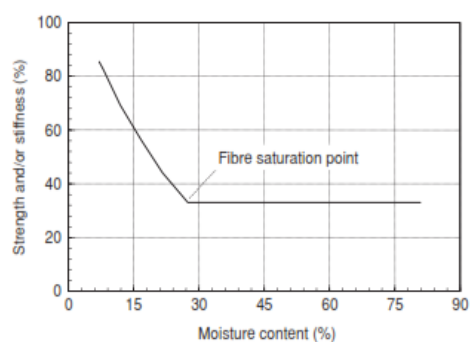


Figura 2.2. Relación entre la resistencia y contenido de humedad en la madera

La normativa NCh 1198 estipula que la madera y los productos derivados de ella deben tener en el momento de su utilización un contenido de humedad igual al correspondiente a la humedad de equilibrio del lugar donde ella prestará servicio.

La normativa NCh 176/1 of 86 establece el procedimiento para el cálculo del contenido de humedad en la madera.

Densidad: La densidad es una de las principales características que influyen en las propiedades mecánicas de la madera. Esta variable está directamente relacionada con el contenido de humedad; Debido a que la madera es un material poroso. La densidad aparente tiene una correlación positiva con la mayoría de sus propiedades mecánicas de la madera, constituyendo normalmente un parámetro indicativo de la resistencia y la rigidez. Por lo tanto, es considerado en investigaciones y en la normativa internacional, referida a la clasificación por resistencia (Blaß & Görlacher, 1996). La normativa NCh 176/2 of 86

estipula el procedimiento para el cálculo de la densidad en la madera. Esta normativa define las siguientes densidades de madera:

- Densidad anhidrida: Relación entre la masa y el volumen de la madera completamente seca.
- Densidad normal: Relaciona masa y volumen de la madera con un contenido de humedad del 12%.
- Densidad básica: Relaciona la masa anhidrida de la madera con su volumen correspondiente a un contenido de humedad del 30%.
- Densidad nominal: Relaciona la masa anhidrida de la madera con su volumen correspondiente a un 12% de humedad.

2.2.3 Propiedades mecánicas.

Dentro de las propiedades mecánicas de la madera, podemos encontrar una elevada resistencia en flexión en comparación a su peso. Si se asocia Resistencia/peso, la madera posee una razón 1.6 veces mayor que el acero y 10 veces mayor que el hormigón para dicha relación. La madera posee una buena resistencia a la compresión y tracción paralela a la fibra, lo cual se contrapone a una moderada o baja resistencia a la compresión y tracción perpendicular a la fibra. Su módulo de elasticidad es bajo en comparación a otros materiales de construcción, siendo este la mitad del módulo de elasticidad del hormigón y veinte veces menos que el del acero; lo cual incide directamente en sus deformaciones y pandeo. A continuación, se presenta el comportamiento mecánico de la madera en distintos tipos de esfuerzos.

a) Tracción y compresión paralelo a la fibra.

La madera es un material que responde bien a esfuerzos de compresión y tracción paralelo a la fibra. Esto es debido principalmente a que el esfuerzo está en dirección de la orientación de las moléculas de celulosa. Para las distintas especies de madera los valores habituales de resistencia a tracción y compresión paralelo a la fibra varían entre 8 N/mm² a 30 N/mm² y 16 N/mm² a 29 N/mm² respectivamente (UNE-EN 338, 2010). En la figura 2.3 se puede apreciar el comportamiento de la madera en sollicitaciones de compresión y tracción paralelo a la fibra.

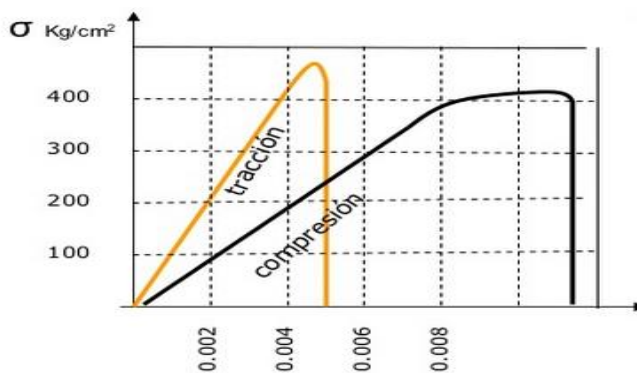


Figura 2.3. Tensión vs deformación de una madera conífera sin presencia de defectos

El ensayo de compresión paralelo a la fibra está normado en nuestro país por NCh 973, mientras que el ensayo de tracción paralelo a la fibra está regido por la normativa chilena NCh 975, 1986.

b) Tracción y compresión perpendicular a la fibra.

La resistencia a esfuerzos de tracción y compresión perpendicular a la fibra de madera es notoriamente menor en comparación a cuando los esfuerzos son paralelos a la fibra. En el caso de la resistencia a la tracción disminuyen un 80%; mientras que en el caso de resistencia a la compresión hay una disminución entre 15 a 17 veces. Esto es debido a las escasas fibras que tiene la madera en la dirección perpendicular al eje del árbol (radios leñosos) y la falta de trabazón transversal de las fibras longitudinales.

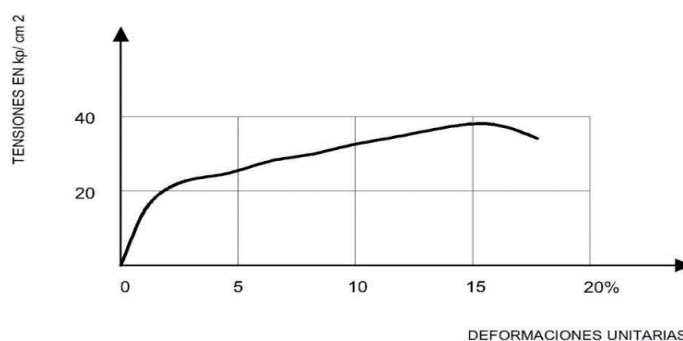


Figura 2.4. Relación entre tensión-deformación en compresión perpendicular a la fibra

El ensayo de compresión normal a la fibra se rige en nuestro país por la normativa Nch 974, mientras que el ensayo de tracción normal a la fibra por la NCh 975.

c) Flexión.

Es la resistencia de la viga sometida a una carga puntual aplicada en el centro de la luz, determinando la tensión en el límite de proporcionalidad, tensión de rotura y el módulo de elasticidad NCh 987, 1986. La madera posee una elevada resistencia a la flexión en comparación a su densidad. Esta se origina por un momento flector que produce en la pieza tensiones de compresión y tracción paralelo a la fibra.

d) Cizalle.

Es la medida de la capacidad de la pieza para resistir fuerzas que tienden a causar deslizamiento de una parte de la pieza sobre otra. De este modo el esfuerzo de corte genera tensiones tangenciales que actúan sobre la fibra de madera de distintos modos:

- Tensiones tangenciales de cortadura.
- Tensiones tangenciales de deslizamiento.
- Tensiones tangenciales de rodadura.

2.2.4 Factores que inciden en las propiedades físicas y mecánicas en la madera.

Para el estudio de la madera como material constructivo es necesario reconocer las variables más significativas que afectan en su comportamiento mecánico. Existen factores inherentes a la madera como

- Nudos
- Desviación de la fibra
- Bolsas de resina
- Madera de reacción
- Frendas
- Acebolladuras
- Madera joven

Por otra parte, existen factores exógenos provocados por su ambiente, proceso de elaboración y condiciones de obra.

a) Factores dentro del proceso de producción.

Dentro del proceso de producción de perfiles de madera se encuentra el aserrado y el secado, durante estos procesos se pueden generar distintas singularidades que afectan al comportamiento estructural de la madera.

Secado: El secado es el proceso destinado a reducir el contenido de humedad en la madera. Este procedimiento es de vital importancia en la manufactura de las maderas. En ocasiones llega a ser la fuente de algunos problemas y defectos cuando se aplica mal, generándose pérdidas en el valor de la madera y a veces pérdida total de la madera. Algunos de sus beneficios son:

- Disminución en el peso de la madera.
- Estabilidad dimensional.
- Resistencia mecánica.
- Prevención de pudrición y manchas.
- Adhesivos.
- Trabajabilidad.
- Aislamiento térmico.

Defectos que pueden producirse en el proceso de secado:

- Grietas
- Arqueadura
- Torcedura
- Acanaladura
- Encorvadura

Aserrado de madera: El aserrado de la madera es la transformación primaria de las trozas o rolas, es decir, el corte primario de la madera, cuya finalidad es dar a la madera una escuadría determinada, la cual no es más que la expresión numérica de los productos o piezas aserradas (espesor, ancho y largo) a través del empleo de sierras de diversos tipos.

El proceso de aserrado en la madera puede tener ciertas imperfecciones u errores que puede provocar una disminución en la resistencia del perfil de la madera, algunos de estos factores son:

- Escuadría irregular
- Grieta
- Rajadura

2.3 Conexiones en madera estructural.

Dentro del diseño estructural de cualquier edificación, se encuentra la necesidad de unir sus elementos principales. Para realizar esta tarea, existen diversos sistemas de conexión los cuales tienen como función principal transmitir de forma segura y con deformaciones admisibles las fuerzas que actúan sobre la estructura. En las edificaciones de madera, las conexiones suponen un punto crítico, aún más que en las construcciones de acero. Esto es debido a la ortotropía y heterogeneidad de la madera, que en conjunto con variables de entorno (Humedad, combinación de diferentes materiales, tiempo de carga. Etc), hacen que sus propiedades resistentes sean muy diferentes según la dirección de los esfuerzos respecto a la orientación de las fibras, lo que requiere, en general, la aportación de herrajes metálicos. La unión es un posible punto débil que es necesario estudiar minuciosamente. Su fallo puede arrastrar a un colapso total o parcial de la estructura (Argüelles Álvarez et al. 2000). La resistencia de la estructura está determinada normalmente por la fuerza de las conexiones; su rigidez será de gran influencia en los desplazamientos. Las dimensiones de los miembros son a menudo determinadas por el número y las características físicas del tipo de conector que se utiliza en lugar de la resistencia del material solicitante.

Los sistemas de conexión, a lo largo de la historia, han ido evolucionando. Provocando un progreso sustancial en la construcción de las estructuras de madera. Durante el siglo XIX, el diseño de las conexiones en madera dependía de la experiencia y habilidad de los maestros de carpintería, el cual realizaba la conexión basado en la realización de encuentros y trabazón entre las piezas mediante cajas o espigas. Su implementación requería la utilización de una menor cantidad de accesorios de conexiones mecánicas modernas y presentaban una vista estética de mejor apariencia, pero su uso fue disminuyendo por la dificultad de encontrar artesanos carpinteros.

En el inicio del siglo XX, nacieron las hoy denominadas conexiones mecánicas, reemplazando a los tacos de maderas que se empleaban para realizar empalmes de barras sometidas a tracción o para incrementar la capacidad a flexión de vigas por conectores de acero que en su comienzo fueron placas dobladas en u o en v. Posteriormente, se desarrollan los anillos introducidos de modo ajustado entre dos piezas de madera, permitiendo cargas más elevadas en perfiles de mayor dimensión, como es el caso de la madera laminada encolada.

Alrededor de 1925 renace el auge de clavos subordinados debido a su resistencia y rigidez, permitiendo unir perfiles de sección reducida con facilidad. Intensificando, de esta manera, su uso en cerchas, vigas y celosías durante la segunda guerra mundial. Finalmente, existe un tercer grupo, que son las conexiones mediante adhesivos. Su utilización consiste en la unión mediante adhesivos con barras encoladas para realizar enlaces rígidos o su aplicación en la confección de madera laminada. Los métodos mecánicos usados para unir elementos estructurales de madera han ido evolucionando desde los primitivos clavos, hasta sistemas más avanzados, como: Los conectores de anillo o placa. Los diversos avances realizados en esta materia, tenían como finalidad proporcionar uniones capaces de resistir mayores esfuerzos con la mínima cantidad de materiales y también conseguir nudos más rígidos, ya que habitualmente las uniones de madera se consideraban de tipo articulado, debido a su baja capacidad para transmitir momentos (Larsen y Jensen, 2000).

Para el desarrollo de las bases teóricas y práctica del trabajo en conexiones de madera, las normativas a nivel mundial han adoptado el modelo de Johansen (1949), que en conjunto con investigaciones posteriores han sentado las bases para determinar la capacidad portante de las conexiones con elementos de fijación tipo clavija.

2.3.1 Uniones mecánicas con elementos de tipo clavija.

Este tipo de unión consisten en la utilización de elementos o barras metálicas cilíndricas que se hincan, insertan o atornillan en los perfiles de madera. Los esfuerzos transmitidos en la unión someten al elemento de conexión a esfuerzos de flexión y corte, lo cual provoca un aplastamiento en la madera. Las conexiones con elementos de fijación de tipo clavija (clavos, bulones, pasadores, tirafondos, tornillos, grampas) constituyen el principal grupo de conexiones mecánicas para uso estructural en general (Racher 1995).

- Clavos: El clavo es el sistema de fijación tipo clavija comúnmente más utilizado en edificaciones de madera. Los clavos son estrechos y rectos, generalmente apuntados y encabezados. En el mercado se puede encontrar una gran variedad en su largo, forma trasversal y área. Su diámetro varía entre 3 mm a 8 mm y su longitud entre 40 mm a 200 mm. Las conexiones clavadas son fáciles de realizar y son adecuadas para

estructuras ligeramente cargadas, donde la conexión es formada por perfiles relativamente delgados.

- **Pernos:** Los pernos tienen un fuste cilíndrico con cabeza y tuerca, de diámetros superiores a clavos y tirafondos (entre 12mm y 30 mm), permitiendo la transmisión de cargas más elevadas. Se emplean para las uniones de piezas de madera aserrada con gruesos mínimos de 40 mm y de piezas de madera laminada. Pueden utilizarse para la unión directa madera/madera o acero/madera.
- **Pasadores:** Los pasadores son barras lisas de acero de sección circular con diámetros comprendidos entre 8 y 24 mm, largos de 50 a 500 mm y extremos de embocaduras biseladas. Dan a la unión un aspecto estético mejor que los pernos al no tener cabeza, tuerca ni arandelas. El taladro es de un diámetro ligeramente inferior (de 0,8 a 1 mm) lo que obliga a su ajuste con cierta presión que garantiza su eficacia en la transmisión de esfuerzos. Se emplean en uniones de piezas de madera laminada encolada combinados, en general, con placas metálicas.
- **Tirafondos:** Los tirafondos o tornillos para madera clásicos o tradicionales se fabrican, en general, con diámetros que varían entre 4 y 20 mm y longitudes de 25 a 300 mm, aproximadamente, con cabeza hexagonal. Este sistema de fijación posee una ventaja ante los clavos por su mayor resistencia a la extracción y una resistencia de carga ante esfuerzos de corte algo superior. Se emplean también en uniones de madera/acero y para uniones de elementos secundarios de arrostramiento.
- **Tornillos autoperforantes:** Los tornillos auto perforantes son un sistema de fijación mecánico el cual gracias a su hilo y tipo de punta permite conectar piezas sin necesidad de una pre perforación. Los tornillos auto-perforantes están compuestos por dos partes, una zona dentada o roscada y otra lisa (hilo), esta particularidad les confiere la característica de tener dos diámetros. En el mercado existe una gran variedad de tornillos auto-perforantes, los cuales están diseñados para unir distintos tipos de materiales como: Metal-policarbonato, metal-madera, madera. Dentro de esta

gama se pueden encontrar tornillos de diferente diámetros y largos. El diámetro, por su parte, es identificado mediante un número proporcional al diámetro de este (#8, #9, #10, #12, #14 etc.), mientras que el largo total varía entre 12[mm] y 140[mm].

La combinación de la caña lisa y roscada en conjunto con el uso de acero templado permiten que estos se puedan cargar en corte y tensión, o una combinación de ambos. Durante la fabricación, su hilo es endurecido, dando lugar a una mayor capacidad de flexión y torsión, pero también a un mecanismo de rotura más frágil. El campo de aplicación es muy extenso. Comprende nudos de vigas trianguladas, nudos de esquina de pórticos a dos aguas, empalmes de piezas de madera, empotramientos de pilares; uniones viga pilar y apoyos sobre pilares, unión de paneles. Etc.

2.3.2 Antecedentes y estado de la investigación en uniones tipo clavija.

Tradicionalmente, la estimación de la capacidad portante en las conexiones se obtenía al realizar ensayos de corta duración en muestras de uniones admitiendo una distribución normal de los resultados reducidos mediante factores de seguridad y de efecto por duración de carga. Sin embargo, este tipo de procedimientos quedaron obsoletos debido a la gran variedad de sistemas y configuraciones de conexiones, siendo estas, insuficientes para estimar con seguridad los valores característicos requeridos conforme al avance de las reglas de diseño estructural. A nivel mundial numerosos códigos de diseño proveen al proyectista estructural una serie de ecuaciones para calcular la capacidad portante de las uniones con elementos tipo clavija. Estas ecuaciones de diseño están basadas en el modelo European Yield model, desarrollado por Johansen (1949). Johansen logró estimar la capacidad portante en una conexión, considerando los posibles modos de falla que se podían desarrollar en la conexión. Los modos de falla dependían básicamente de dos componentes:

1. El “efecto clavija”: Depende de la resistencia del conector a flexión y de la resistencia al aplastamiento en la madera.
2. El “efecto tensional”: Depende de la resistencia del conector a tensión y la presencia de fricción entre la superficie de apoyo.

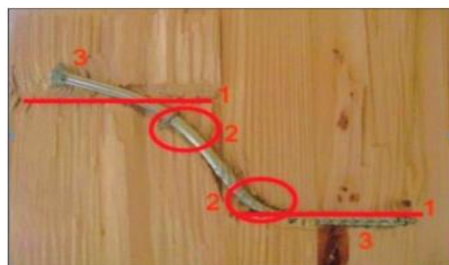


Figura 2.5. Fallo de una conexión realizada con clavija

En la Figura 2.5 se puede apreciar la presencia de los efectos mencionados: En el sector 1, la madera sufre una deformación debido al aplastamiento. En el sector 2 surge la presencia de una rótula plástica del conector. En el sector 3 se representa la resistencia a la tracción. Johansen realizó su estudio en uniones de cortadura simple y doble, considerando tres modos de fallo: Falla por la incrustación en la madera debajo del sujetador, fallo en el elemento de fijación debido a la formación de una rotula plástica y, por último, fallo de la conexión debido a la formación de una rotula plástica en todos los elementos de la conexión. Johansen estimó la capacidad portante de las conexiones, considerando distintas hipótesis de distribución de tensionales según el tipo de deformación de la clavija. Para la elaboración de estas ecuaciones Johansen supone que:

- La clavija y la madera desarrollan un comportamiento esfuerzo-deformación de carácter plástico

En la figura 2.6 se presentan los modos de fallo, con su respectiva relación de esfuerzos. El esfuerzo tensional de aplastamiento en la madera es modelado como una función lineal de pendiente nula en las zonas de aplastamiento, presentando una distribución curva en las zonas donde el elemento de conexión presenciaba una rótula plástica.

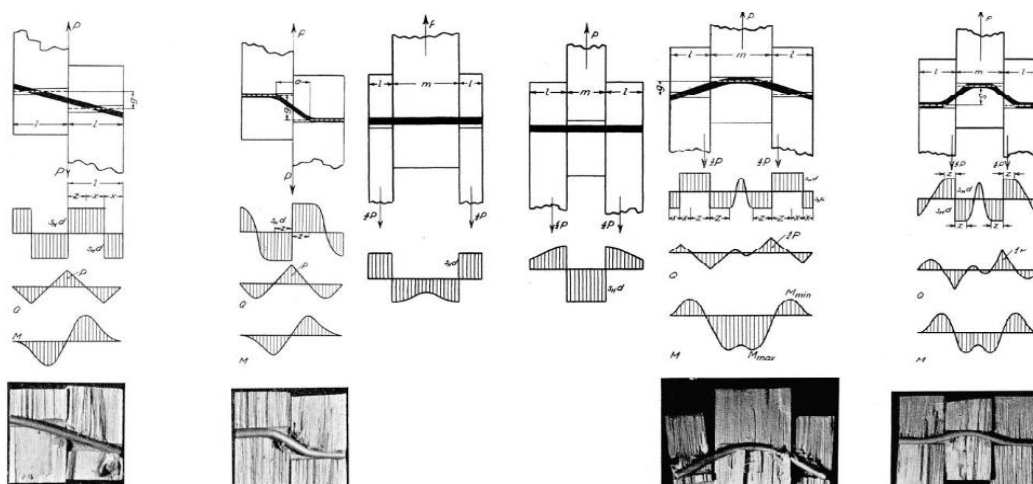


Figura 2.6 Distribución de tensiones en conexiones de corte simple y doble (Johansen, 1949)

En el artículo “Lateral bearing capacity of nailed joints based on the yield theory” (Aune et al. 1986) se recopilan algunos estudios posteriores, basados en la teoría de Johansen.

- K. Möller (1950) aplicó la teoría básica de rendimiento a las conexiones simples y dobles en su publicación. Su investigación se centró en conexiones con dos y tres miembros asimétricos. También incluyó el efecto de tener miembros en conjunto con distinta resistencia al aplastamiento. Aunque los principios habían sido introducidos por Johansen 10 años antes, la teoría de rendimiento referente a uniones clavadas se refiere a menudo como “teoría de Möller”.
- A. Mayer (1957) en el trabajo “Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei Statischer Belastung” analizó el efecto de la fricción. Mayer se liberó de algunas propuestas en el modelo de Johansen, considerando diferencias en las propiedades de los materiales, el espesor de los cuerpos de sujeción y tomó en cuenta la capacidad de flexión plástica del elemento de sujeción.
- Larsen y Reestrup (1969) desarrollaron en su estudio “Test on the screw in wood”, el comportamiento de tornillos en conexiones de madera. Los resultados obtenidos indican que el comportamiento en conexiones mediante el uso de tornillos, cargados lateralmente en los extremos, difiere ligeramente de las uniones roscadas a lo largo de toda la unión. Esto sucedía por diferentes valores de incrustación a lo largo del tornillo. Además, la fluencia puede producirse tanto en los vástagos, como en los hilos, de modo que se debe considerar diferentes valores de momento de fluencia. Las fórmulas para la capacidad portante se obtuvieron y verificaron mediante pruebas.
- H.J.Larsen(1973), en “The yield load of bolted and nailed joint” dispuso la base racional que contribuyó al uso de la teoría del rendimiento en la normativa de países escandinavos.
- Rodd (1973) desarrolló su trabajo en conectores circulares y anillos, desarrollando la base del trabajo continuo para construir uniones resistentes al momento en marcos de madera laminada-encolada. Sus observaciones demostraron que la unión mediante pasadores circulares tenía alta fricción con la madera, aumentando las fuerzas en la unión.
- J. Ehlbeck (1979) realizó un estudio exhaustivo del estado del diseño en juntas clavadas en madera y en productos derivados de la madera. Resumió las

investigaciones de los últimos 20 a 30 años, en relación a diferentes teorías de desempeño de conjunto, criterios de diseño, códigos nacionales y métodos de prueba. Una extensa lista de referencia y una lista de literatura adicional pertinente hacen que su investigación sea completa y útil. Ehlbeck, afirma que las investigaciones deberían estar dirigidas a “Conclusiones uniformes, en lugar de realizar investigaciones aisladas dentro de los límites nacionales”.

- Aune and Patton-Mollary (1986) y Keenan et al. (1982) incluyeron los efectos producidos por la fricción y por cargas axiales. Los resultados concluyentes estimaron un aumento en la resistencia del 30 %, debido a la incorporación de la fricción en uniones clavadas. Además, demostraron que el “European Yield Model” podía ser aplicado en uniones clavadas.
- Soltis (1987) en su artículo “Angle to grain strength of dowel-type fasteners. Wood Fiber” desarrolla un programa experimental evaluando la Resistencia a la madera perpendicular y paralelo a la fibra. Su programa consistió en ensayos de extracción lateral en probetas de cizalle simple. Las probetas fueron confeccionadas con dos especies de madera (alta y baja densidad), utilizando medios de unión de distinto diámetro, tales como: Tornillos, clavos y pasadores de distintos diámetros. Sus conclusiones indicaban que la resistencia al aplastamiento dependía de la dirección de la fuerza. Encontró diferencias entre la resistencia paralelo y perpendicular a la fibra, la cual dependía del diámetro, disminuyendo en conectores de diámetro menor.
- Ehlbeck & Werner (1992) desarrollaron un programa experimental confeccionando probetas con diferentes tipos de madera, usando como elementos de unión bulones con diámetros entre 8mm y 30mm. Las probetas fueron sometidas a compresión y tracción paralela a la fibra de madera. En sus resultados concluyeron que la resistencia al aplastamiento depende significativamente del diámetro del conector. Los orificios 2 mm más grandes que el diámetro del conector no influyen significativamente en la resistencia al aplastamiento. Sus resultados indicaron que la resistencia al aplastamiento disminuye conforme se aumenta el ángulo en que se aplica la carga. Esta reducción se acentuaba más cuando el diámetro del conector era mayor.
- Jorissen (1998), en su trabajo “Double shear timber connection with dowel type fastener”, analiza he intenta explicar la falla de tipo dúctil en conexiones de madera

apernadas. El estudio se basó en el “European yield model”, calculando las tensiones a lo largo de la trayectoria de ruptura potencialmente críticas dentro del miembro de madera. Las tensiones promedio de tracción perpendicular a la fibra de la madera y cizalladura fueron comparadas con el modelo de mecánica de fractura para predecir la capacidad resistente de la conexión. Jorissen informa que el número de elementos de fijación que conforman la unión, el espaciamiento entre ellos y la esbeltez de estos, son los parámetros más importantes para calcular el número efectivo de elementos (n_{ef}).

- Sawata & Yasumura (2002) Desarrollaron un programa experimental para evaluar la resistencia al aplastamiento en la madera. Su estudio estuvo basado en el método europeo EN383, estimando el punto de fluencia con el método 5% de desplazamiento (basado en la NDS), y el método 15 mm de desplazamiento (basado en el eurocodigo 5). Las probetas fueron diseñadas con dos tipos de madera (*Picea jezoensis* y *Abies sachalinensis*) de cuatro grados estructurales (L90, L100, L110 y L125), utilizando 4 diámetros de conector (8 mm, 12 mm, 16 mm y 20 mm). Sus conclusiones indicaron que la resistencia al aplastamiento paralelo a la fibra de madera muestra valores cercanos para los dos métodos utilizados. En el método 5% de desplazamiento, la resistencia al aplastamiento perpendicular a la fibra, mostró una baja influencia por el diámetro del conector; mientras que para el método de 15 mm esta disminuía a medida que el diámetro aumentaba. La fuerza de incrustación, evaluada por el método de compensación del 5%, se puede estimar a partir del diámetro de la clavija y la densidad de la madera. El valor de diseño de la fuerza de empotramiento en el estándar “Eurocode 5” es útil para la resistencia de incrustación evaluada por la carga máxima de hasta 5 mm de desplazamiento, según EN383.

2.3.3 Modos de falla y capacidad portante.

Los procedimientos de cálculo de la NCh 1198 se basan en el criterio de tensiones admisibles. Este criterio general de diseño corresponde al adoptado por EEUU en su versión ASD. La normativa chilena NCh1198, estipula seis modos de falla para conexiones en corte simple y cuatro modos de falla para cizalle doble, tanto los modos de falla como la capacidad portante están basados en la “European yield model”. A cada modo de falla se le asigna una capacidad

portante P_{ei} , la cual está determinada por 3 parámetros principales: Resistencia al aplastamiento (R_{ap}), tensión de fluencia en flexión del acero (F_{ff}) y la geometría de la conexión; siendo el valor característico de la capacidad portante el menor valor producto de los posibles modos de falla. Cabe mencionar que los modos de falla, desarrollados en la teoría de Johansen, no contemplan fallas por ruptura frágil. Por lo anterior, las normativas incluyen factores y restricciones para asegurar que la ruptura de la conexión se desarrolle en el rango plástico. Dentro de estos se puede nombrar: El factor de grupo, valores mínimos de separación entre miembros de conexión y distancia al borde. En la figura 2.7 se presentan los modos de falla, estipulados en la normativa NCh 1198.

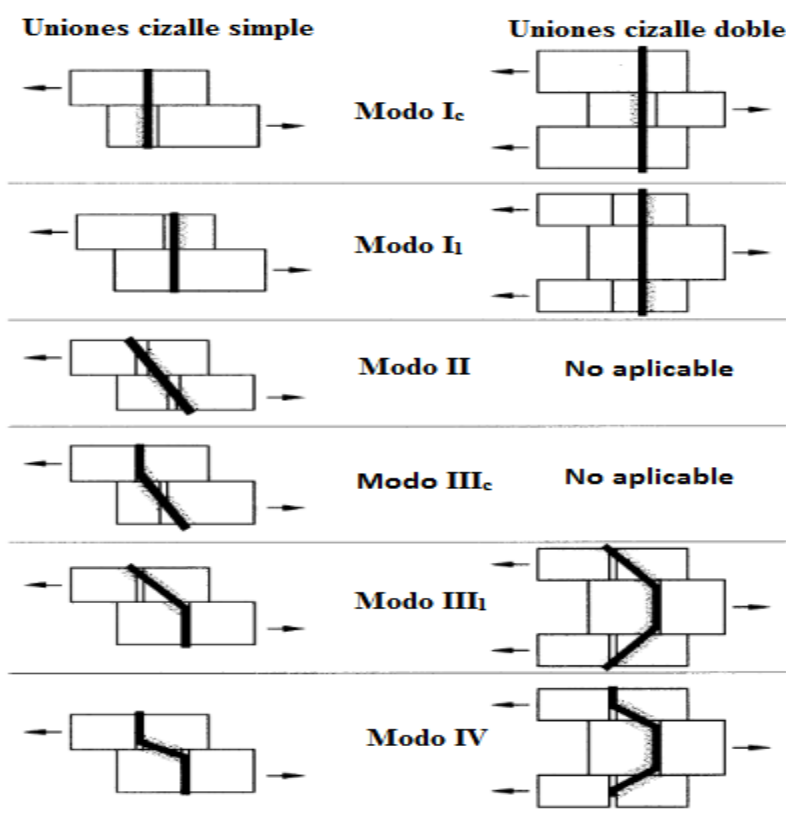


Figura 2.7. Modos de fluencia en uniones de madera con elementos de fijación mecánicos

- Modo Ic y Ii: Representan una fluencia dominada por el aplastamiento de las fibras de madera en contacto con el medio de unión, ya sea en el madero principal o en la(s) pieza(s) secundaria(s), respectivamente.
- Modo II: Representa el pivoteo del medio de unión en el plano de contacto entre maderos de una unión de cizalle simple con un aplastamiento localizado de fibras de madera en la vecindad de la cara de la(s) pieza(s) de madera.

- Modos III_c y III_l : Representan la fluencia en flexión del medio de unión en un punto de rótula plástica por plano de contacto maderos y la fluencia dominada por el aplastamiento de las fibras de madera en contacto con el medio de unión, ya sea en la pieza principal o en la(s) pieza(s)secundaria(s), respectivamente.
- Modo IV: Representa la fluencia en flexión del medio de unión en dos puntos de rótula plástica por plano de contacto entre maderos, con un limitado aplastamiento localizado de fibras de madera en la vecindad del o de los planos de contacto entre maderos P_{el.Ic}

Capacidad portante en uniones de cizalle simple asignada a cada modo de falla (según figura 2.7):

Modo Ic:

$$P_{el} = \frac{D \times l_c \times R_{pa,c}}{FA} \quad Ec2.1$$

Modo I_l:

$$P_{el} = \frac{D \times l_l \times R_{pa,l}}{FA} \quad Ec2.2$$

Modo II:

$$P_{el} = \frac{K_1 \times D \times l_l \times R_{pa,l}}{FA} \quad Ec2.3$$

Modos III_c:

$$P_{el} = \frac{K_2 \times D \times l_c \times R_{pa,c}}{FA} \quad Ec2.4$$

Modos III_l:

$$P_{el} = \frac{K_3 \times D \times l_l \times R_{ap,c}}{(2+R_e) \times FA} \quad Ec2.5$$

Modos IV:

$$P_{el} = \frac{D^2}{FA} \sqrt{\frac{2 \times R_{ap,c} \times F_{ff}}{3 \times (1+R_e)}} \quad Ec2.6$$

Capacidad portante en uniones de cizalle doble asignada a cada modo de falla (según figura 2.7):

Modo Ic:

$$P_{el} = \frac{D \times l_c \times R_{ap,c}}{FA} \quad Ec2.7$$

Modo I_l:

$$P_{el} = \frac{2 \times D \times l_l \times R_{ap,l}}{FA} \quad Ec2.8$$

Modo III_l:

$$P_{el} = \frac{2 \times D \times K_3 \times l_l \times R_{ap,c}}{(2 + R_e) \times FA} \quad Ec2.9$$

Modos IV:

$$P_{el} = \frac{2 \times D^2}{FA} \sqrt{\frac{2 \times R_{ap,c} \times F_{ff}}{3 \times (1 + R_e)}} \quad Ec2.10$$

Donde:

$$K1 = \frac{\sqrt{Re + 2Re^2 \times (1 + Rt + Rt^2) + Rt^2 \times Re^3 - Re \times (1 + Rt)}}{1 + Re} \quad Ec2.12$$

$$K2 = -1 + \sqrt{2 + \frac{2 \times F_{ff} \times (1 + 2 \times Re) \times D^2}{3 \times R_{ap,c} \times l_c^2}} \quad Ec2.13$$

$$K3 = -1 + \sqrt{2 \times \left(\frac{1 + Re}{Re}\right) \times \frac{2 \times F_{ff} \times (2 + Re) \times D^2}{3 \times R_{ap,c} \times l_l^2}} \quad Ec2.14$$

$$R_e = \frac{R_{ap,c}}{R_{ap,l}}$$

$$R_c = \frac{R_c}{l_l}$$

P_{el} : Capacidad de carga admisible, N.

l_c : longitud de apoyo del pasador en la pieza principal, mm.

l_l : longitud de apoyo del pasador en la pieza lateral, mm.

FA: factor de ajuste según

$R_{ap,c}$: resistencia de aplastamiento del vástago en el madero principal, MPa.

$R_{ap,l}$: resistencia de aplastamiento del vástago en el madero secundario, MPa.

F_{ff} : tensión de fluencia en flexión del acero, MPa.

D: diámetro nominal del medio de unión, mm.

Ecuaciones para el factor de ajuste (FA) según diámetro del conector y modo de fluencia:

Cuando $D < 6.4\text{mm}$ para los modos de fluencia (Ic, I_l, II, III_c, III_l, IV) → $FA = K_d$

Cuando $6.4\text{mm} \leq D \leq 25\text{mm}$ para los modos de fluencia (Ic, I_l) → $FA = 4 * K_\alpha$

Cuando $6.4\text{mm} \leq D \leq 25\text{mm}$ para el modo de fluencia (II) → $FA = 3.6 * K_\alpha$

Cuando $6.4\text{mm} \leq D \leq 25\text{mm}$ para los modos de fluencia (III_c, III_l, IV) → $FA = 3.2 * K_\alpha$

Dónde:

$$K_\alpha = 1 + \frac{\alpha_{max}}{360^\circ}$$

α_{max} : Máxima desangulación entre la dirección de la fuerza y la fibra de cualquier pieza en la unión ($0^\circ \leq \alpha \leq 190^\circ$)

$$K_d = 2.2$$

Para $D \leq 6.4 \text{ mm}$

$$K_d = \frac{10 \times D + 12.7}{25.4}$$

Para $4.3\text{mm} \leq D \leq 6.4\text{mm}$

2.3.4 Resistencia al aplastamiento R_{ap} .

La resistencia al aplastamiento (R_{ap}) es una propiedad física de la madera definida como la resistencia media de la madera bajo la acción de un elemento de conexión recto cargado. La resistencia al aplastamiento no depende únicamente de la madera, sino de diversos factores propios de la configuración de la conexión. Werner (1993) resumió los datos disponibles en la literatura, he identificado los parámetros más importantes en la resistencia al aplastamiento:

- Densidad: La resistencia al aplastamiento en madera suave, madera dura y madera contrachapada incrementa linealmente con la densidad.
- Conector y diámetro del agujero: Al aumentar el diámetro del conector, la resistencia al aplastamiento disminuye, sin embargo, la influencia de este es menor en comparación a la densidad. El diámetro del agujero del conector 2 mm mayor no tiene influencia significativa.
- Angulo entre la carga y la dirección de la fibra: La influencia de la carga respecto a la dirección de la fibra es más pronunciada a medida que aumenta el diámetro del conector, siendo distinta para maderas suaves y duras.

- Fricción entre el conector y la superficie de madera: Un incremento en la rugosidad del conector o adhesivo entre la madera y el sujetador aumenta la resistencia al aplastamiento y disminuye la tendencia de la madera a partirse, para cargas paralelas a la fibra. La influencia de la superficie del conector esta descrita en Rodd (1973).
- Contenido de humedad: Como la mayoría de las propiedades resistentes en la madera, la resistencia al aplastamiento depende del contenido de humedad bajo el punto de saturación de la fibra.

La resistencia al aplastamiento es uno de los parámetros más importantes dentro del cálculo de la capacidad portante de una conexión y está incluida dentro de los posibles modos de falla. En la práctica la resistencia al aplastamiento se debe estimar basándose en información indirecta de la conexión como: el diámetro del sujetador, la densidad de la madera y la dirección de la fuerza respecto a la dirección de la fibra. La normativa NCh 1198 proporciona las siguientes ecuaciones para el cálculo de la resistencia al aplastamiento:

La resistencia al aplastamiento nominal para pernos, pasadores y tirafondos de diámetro mayor o igual a 6.4 mm.

- Para solicitaciones paralelas a la fibra

$$R_{ap,p} = 77.2 * \left(\frac{\rho_o}{1000} \right), \text{ Mpa} \quad \text{Ec2.15}$$

- Para solicitaciones perpendiculares a la fibra

$$R_{ap,p} = \frac{212 * \left(\frac{\rho_o}{1000} \right)^{1.45}}{\sqrt{D}}, \text{ Mpa} \quad \text{Ec2.16}$$

Donde:

ρ_o = Densidad anhidra media de la especie forestal, medida en kg/m^3 .

D= diámetro del conector, medido en mm.

Cuando una pieza en unión se solicita según un ángulo con respecto a la dirección de la fibra, la resistencia de aplastamiento, θ , R_{ap} , para la pieza se determinará aplicando la fórmula de Hankinson:

$$R_{ap,\theta} = \frac{R_{ap,p} * R_{ap,n}}{R_{ap,p} * \text{sen}^2\theta + R_{ap,n} * \text{cos}^2\theta}, \text{ Mpa} \quad \text{Ec2.17}$$

Donde:

Θ = ángulo (agudo) entre la dirección de la sollicitación y la dirección de la fibra (asociada al eje longitudinal de la pieza).

La resistencia de aplastamiento nominal en las paredes de agujeros para clavos y tirafondos de diámetro menor que 6,4 mm se determina, independientemente de la desangulación fuerza-fibra, mediante la expresión:

$$R_{ap,p} = 72.2 * \left(\frac{p_o}{1000} \right)^{1.84}, \text{ MPa} \quad \text{Ec2.18}$$

Sin embargo, la resistencia al aplastamiento se puede caracterizar mediante curvas carga-desplazamiento obtenidas a través de ensayos experimentales. La normativa NCh 1198 tiene como referencia el ensayo ASTM D5764. Las ecuaciones de la tabla 2.14 (modos de fluencia) predicen la resistencia de fluencia en conexiones, este punto de fluencia no siempre está bien definido en las curvas esfuerzo-deformación de ensayos en conexiones. El enfoque dado por la NSD (2015) define el punto de fluencia como la carga obtenida producto de la intersección del gráfico esfuerzo-deformación con la recta formada en la zona elástica desplazada un 5% del diámetro del conector. Esta definición de punto de fluencia fue propuesta por Harding and Fowlkes (1984) siendo validada experimentalmente por Wilkinson (1990)

2.3.5 Tensión de fluencia de los medios de unión F_{ff} .

Las ecuaciones de la capacidad portante en conexiones de madera son inferidas respecto a los posibles modos de falla, dentro de estos existe la posibilidad de que la conexión falle debido a una plastificación del elemento de fijación. Por esta razón, la tensión de fluencia en el medio de unión es una de las variables implícitas dentro de las ecuaciones de la capacidad portante. La normativa NCh 1198 especifica la tensión de fluencia para distintos diámetros de conector:

- $D \leq 6.4 \text{ mm}$

$$F_{ff} = 896 - 56D, \text{ Mpa} \quad \text{Ec2.18}$$

- $D = 6.4 \text{ mm}$

$$F_{ff} = 480, \text{ Mpa} \quad \text{Ec2.19}$$

- $D = 8 \text{ mm}$

$$F_{ff} = 410, \text{ Mpa} \quad \text{Ec2.20}$$

- $D \geq 9.5$ mm

$$F_{ff} = 310, \text{ Mpa}$$

Ec2.21

Donde:

D: Diámetro del conector, medido en mm.

La estimación de la tensión y fluencia del medio de unión se estudia por medio de ensayos experimentales. La normativa NCh 1198 tiene como referente el ensayo ASTM F1575 y ASTM F606 para medios de unión corto y diámetro grande, para los que el ensayo a flexión ASTM F1575 resulta impracticable hacer. Dentro del capítulo 3, que hace referencia al programa experimental, se presenta en detalle el ensayo ASTM F1575.

Capítulo 3 Programa experimental.

En el presente capítulo se presenta el procedimiento experimental desarrollado en el laboratorio, el cual se empleó con el fin de caracterizar las propiedades de “tensión de fluencia en el acero” y “resistencia al aplastamiento en la madera”. En el apartado 3.2 y 3.3, se expondrá los ensayos realizados en el programa experimental, los cuales están basados en la normativa norteamericana ASTM-F1575 y ASTM-D5764 respectivamente. La importancia del programa experimental para el desarrollo de este proyecto de investigación es que, gracias a los resultados obtenidos, se podrá hacer un análisis teórico/experimental comparando lo estipulado en la normativa chilena NCh 1198 con los resultados de cada experimento.

Las hipótesis respaldadas he inferidas respecto a la información teórico-experimental recopilada en el marco teórico son:

1. La resistencia al aplastamiento de la madera, en su expresión teórica depende de su densidad y del diámetro del conector.
2. La resistencia al aplastamiento de la madera depende de la orientación del conector respecto a la dirección de la fibra de la madera.
3. La tensión de fluencia en el acero es inversamente proporcional al diámetro del conector.

Los criterios de diseño en conexiones de la normativa NCh 1198 estipulan que las hipótesis 2 y 3 planteadas anteriormente son válidas para conexiones confeccionadas con conectores de diámetro grande ($D > 6.4\text{mm}$), puesto que para las conexiones de diámetro pequeño ($D < 6.4\text{mm}$), el único factor que influye en la resistencia al aplastamiento es la densidad de la madera. Bajo esta premisa, el programa experimental no solo busca hacer una comparación entre la resistencia empírica y teórica, sino que también, se pretende validar el criterio adoptado de esta.

Previo a la exposición de los ensayos, en el apartado 3.1 se detallan los materiales y maquinaria empleada en cada ensayo.

3.1 Materiales.

Para el desarrollo del ensayo “resistencia al aplastamiento en la madera”, fue necesaria la confección de probetas configuradas y dimensionadas en base a la normativa ASTM-D5764. Las probetas fueron compuestas por medio del dimensionado de escuadrías de dos tipos de madera: Raulí y Pino radiata. Para el experimento se utilizaron tornillos auto perforantes como medios de unión.

Para el ensayo de “tensión de fluencia en el acero”, solo fue necesaria la utilización de los tornillos auto perforantes.

- **Raulí**

Las piezas de raulí tenían como dimensión 4.5 cm x 15 cm x 3.2 m. La madera fue secada en cámara, asegurando así un contenido de humedad entre 10% y 14%.

- **Pino Radiata**

Las piezas de Pino radiata tenían como dimensión 4.3 cm x 15 cm x 2.4 m. La madera fue secada artificialmente asegurando así un contenido de humedad menor a 14%.

3.1.1 Tornillo autoperforantes.

Para el desarrollo experimental se escogieron 3 diámetros distintos (#8, #10, #14) los cuales poseen un diámetro de hilo de 2.8 mm, 3.6 mm y 4.11 mm. Los tornillos de diámetro #10 y #14, fueron fabricados por la empresa Mamut; mientras que los tornillos de diámetro #8, fueron elaborados por la empresa Importper. Para efectos de ensayo y cálculo de los distintos parámetros, los ensayos ASTM-F1575 y ASTM-D5764 consideran el diámetro del hilo.

3.14 Maquinaria e instrumentación.

Para el desarrollo de los dos ensayos se utilizó una máquina de prueba de compresión automática marca Controls, modelo multispeed 34-v1074, con una capacidad de carga de 50 KN y un rango de velocidades de aplicación de carga entre 0.05 a 51 mm/min. Las deformaciones producidas en cada experimento se midieron mediante un sensor LVDT. La máquina de compresión y el sensor de posición están conectados a un data logger, marca Controls, modelo Digimax touch 82-p60r02, el cual registra la carga y desplazamiento en el desarrollo experimental. En la figura 3.1 se presenta la instrumentación y maquinaria utilizada en el desarrollo experimental.

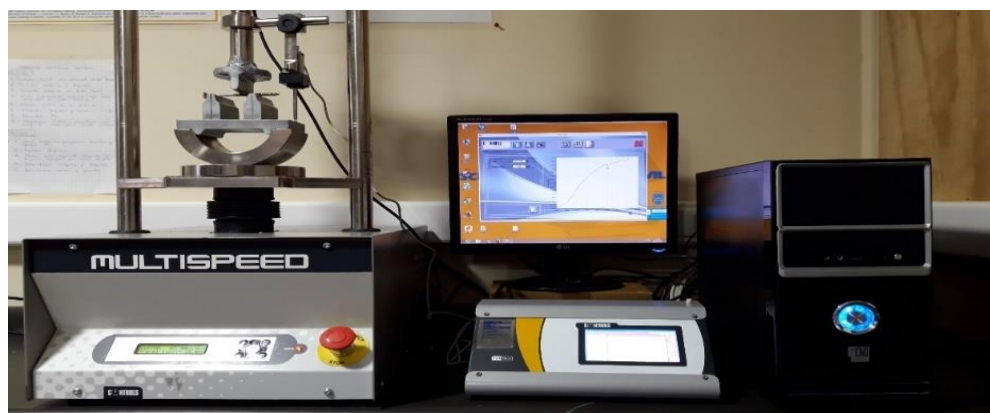


Figura 3.1. Maquinara e instrumentación utilizada en el desarrollo experimental

3.2 Generalidades del ensayo “Tensión de fluencia a flexión en tornillos autoperforantes”.

El diseño de este ensayo está basado en la normativa americana ASTM-F1575 “Standard Test Method for Determining Bending Yield Moment of Nails”. La normativa estandariza el procedimiento para obtener el momento de fluencia en clavos sometidos a una carga estática. Para la obtención del momento de fluencia, el tornillo auto-perforante es sometido a un ensayo de flexión en tres puntos el cual se esquematiza en la figura 3.2.

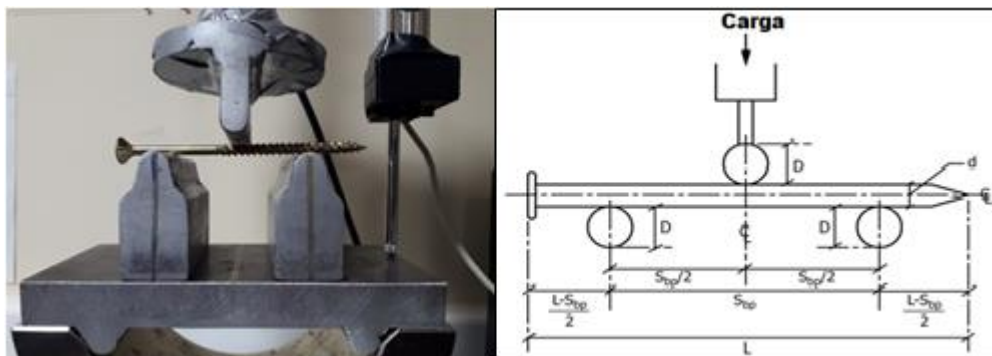


Figura 3.2. Montaje y esquema ensayo tensión de fluencia en el acero

Como se puede apreciar en el esquema, el tornillo auto-perforante se posa en dos apoyos cilíndricos; mientras que en un tercer punto equidistante entre los apoyos ($S_{bp}/2$) se aplica una carga a una velocidad constante $v_1 = 6.35$ mm/min. El diámetro “D” de los apoyos esta estandarizado con un valor de 9.52 mm y la separación entre apoyos S_{bp} es 11.5 veces diámetro del tornillo. Desde el inicio del ensayo se registra la carga y desplazamientos, ambos datos imprescindibles para obtener una curva carga-desplazamiento.

Debido a que la tensión de fluencia varia inversamente proporcional al diámetro del conector, se decidió aplicar el ensayo para 3 diámetros de conector (2.8mm, 3.6 mm y 4.11mm), realizando diez ensayos por diámetro. Por consiguiente, la separación entre apoyos S_{bp} queda definida como 32.2 mm para los tornillos de diámetro 2.8 mm, 41.4 mm para los tornillos de diámetro 3.6 mm y 47.2 mm para los tornillos de diámetro 4.11 mm.

3.2.1 Tensión de fluencia en el acero F_{yb}

Para la determinación de la tensión de fluencia en el acero F_{yb} , es necesario incurrir al registro de fuerzas y desplazamientos en cada ensayo, para así formar una curva característica de fuerza-desplazamiento. Posteriormente se interpolan los puntos pertenecientes al rango elástico del grafico fuerza-deformación, obteniendo una recta que se ajusta mejor a los puntos. Finalmente, la recta obtenida en la interpolación se desplaza en el eje de las abscisas un 5% del diámetro del tornillo en estudio. El punto de intersección de la recta desplazada con la curva fuerza-desplazamiento es denominado carga de fluencia P. En la figura 3.3 se ilustra el proceso realizado para obtener la fuerza de fluencia.

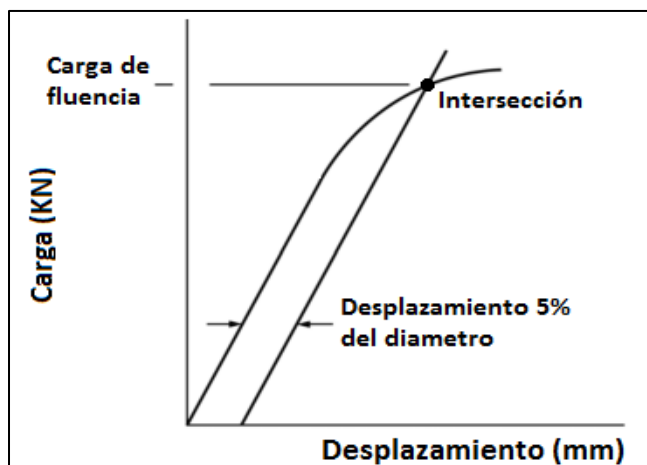


Figura 3.3. Curva carga-desplazamiento

Teniendo la carga de fluencia P , es posible obtener el momento de fluencia bajo la hipótesis de que el ensayo representa una viga con dos apoyos fijos en sus extremos y una carga puntual en el centro. Bajo esta hipótesis, el momento de fluencia queda definido por la siguiente expresión:

$$M_y = \frac{P_o \times S_{bp}}{4}, \quad \text{Ec3.1}$$

Dónde:

M_y : Momento de fluencia (N*mm).

P : Carga de fluencia obtenida del gráfico carga vs deformación (N).

S_{bp} : Separación entre apoyos (mm).

Finalmente, la fuerza de fluencia F_{yb} queda determinada por el cociente entre el momento de fluencia y el módulo de sección plástica efectiva S :

$$F_{yb} = \frac{M_y}{S}, \text{ Mpa} \quad \text{Ec3.1}$$

Dónde:

F_{yb} = Tensión de fluencia en el acero.

S : Módulo de sección plástica efectiva

$$S = \frac{D^3}{6}, \text{ mm}^3$$

3.3 Generalidades del ensayo “Resistencia de aplastamiento en la madera”.

El diseño de este ensayo está basado en la normativa americana ASTM D5764 “Standard test method for evaluating dowel-bearing strength of Wood and Wood basement products”. La normativa estandariza los procedimientos básicos necesarios para evaluar la resistencia al aplastamiento de la madera. Los resultados obtenidos en el ensayo son utilizados para determinar la resistencia a cargas estáticas y deformaciones producidas por la aplicación de una carga transmitida a través de sistemas de fijación tales como: Clavos, tornillos, pasadores y pernos. Para el desarrollo del experimento, es necesario confeccionar probetas de madera con forma de paralelepípedo con un agujero perpendicular a la cara de la muestra, el cual será utilizado para introducir el elemento de fijación. Las dimensiones del paralelepípedo están regidas por la normativa ASTM D5764, la cual estipula restricciones dependientes del diámetro del conector. Restricciones en el dimensionamiento:

- Ancho \geq El menor valor entre 38[mm] o 2 veces el diámetro del conector.
- Largo \geq El valor mayor entre 50[mm] o 4 veces el diámetro del conector.
- Alto superior \geq El valor mayor entre 50[mm] o 4 veces el diámetro del conector.
- Alto inferior \geq El valor mayor entre 50[mm] o 4 veces el diámetro del conector.

El ensayo se realiza ejerciendo una carga de compresión en los extremos sobresalientes del conector en la probeta, a través de una pinza de carga. La fuerza de compresión es transmitida desde el conector a la probeta a razón de 1[mm/min] mientras se va obteniendo un registro de la carga y deformación en todo momento. A continuación, en la figura 3.4 se presenta dos esquemas representativos del ensayo.

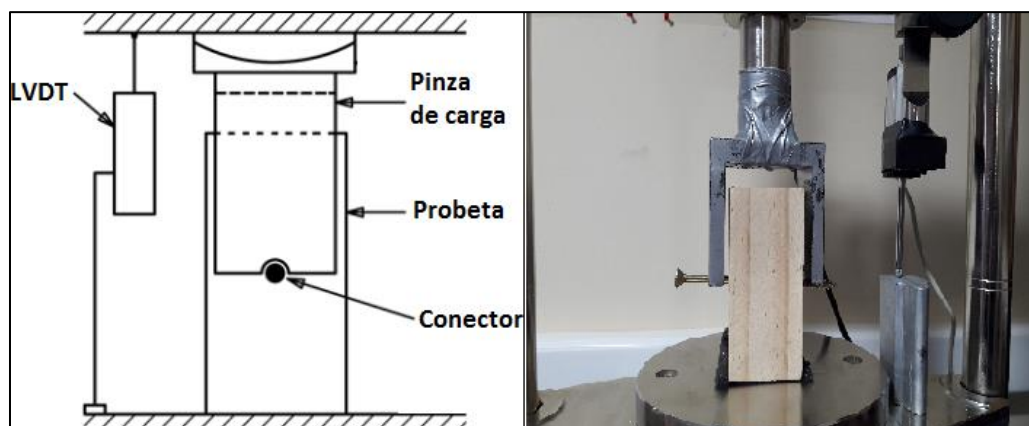


Figura 3.4. Montaje y esquema, ensayo resistencia al aplastamiento

3.3.1 Probetas de ensayo.

La dimensión y configuración de las probetas fueron diseñadas respondiendo a dos criterios. El primero responde a las dimensiones mínimas que estipula la normativa ASTM D5764, creando así, probetas de 45 x 50 x 100 (mm). El segundo criterio considera a los distintos parámetros que intervienen en la resistencia al aplastamiento de la madera, los cuales fueron planteados en el marco teórico (2.3.4), de los cuales se estudiarán: Diámetro del tornillo autoperforante (2.8mm, 3.6mm y 4.11mm), Densidad de la madera (Raulí o Pino), dirección de carga respecto a la fibra de madera (paralela y perpendicular). Bajo esta premisa se confeccionaron 7 probetas por cada combinatoria entre los parámetros en estudio, obteniendo así un total de 84 probetas.

3.3.2 Resistencia al aplastamiento R_{ap} .

Para la determinación de la resistencia al aplastamiento en la madera, se desarrolla una metodología similar a la que se empleó en la obtención de la fuerza de fluencia (F_{ya}) del ensayo ASTM F1575. Finalmente, la resistencia al aplastamiento en la madera queda definida por la carga de fluencia y el área de contacto, pudiéndose estimar de la siguiente manera:

$$R_{ap} = \frac{P}{t \times D} \quad \text{Ec3.1}$$

Dónde:

Rap: Resistencia al aplastamiento en la madera, MPa.

P: Carga de fluencia, N.

D: Diámetro del conector, mm.

t: espesor, mm.

Capítulo 4: Presentación y análisis de resultados.

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos a partir del programa experimental. En el apartado 4.1 se refiere a los resultados obtenidos de ensayos experimentales basados en el ensayo estandarizado ASTM F1575, utilizado para caracterizar

la tensión de fluencia en tornillos auto-perforantes. El apartado 4.2 se presenta los resultados obtenidos de ensayos experimentales basados en el ensayo estandarizado ASTM D5764, utilizado para caracterizar la resistencia al aplastamiento en la madera. Los datos obtenidos serán procesados a través de análisis estadísticos con el fin de obtener y analizar: Medidas de tendencia central, dispersión de datos y correlación entre los factores y la variable en estudio; finalmente se realiza una comparación de los resultados con los criterios de cálculo de la normativa nacional NCh 1198. Los resultados experimentales de cada ensayo se presentan en detalle en el Anexo A. Los métodos de prueba que se realizaron para hacer el análisis estadístico se encuentran registrados en el Anexo B. Las fallas producidas en las probetas y tornillos, tanto como para el ensayo de tensión de fluencia en flexión y resistencia al aplastamiento se presentan en detalle en el Anexo C

4.1 Tensión de fluencia en tornillos auto-perforantes.

Este ensayo fue aplicado a 30 tornillos de tres diámetros diferentes, con el fin de caracterizar la tensión de fluencia. Este da como resultado un registro carga-desplazamiento con el cual se es posible obtener una curva característica del acero a flexión (Apendice A). El punto de interés para caracterizar la tensión de fluencia en los tornillos es la carga de fluencia.

En los gráficos A.13, A.14 y A.15 se puede apreciar que el comportamiento de los tornillos auto-perforantes responde al de un material dúctil. Los tornillos después de haber alcanzado su carga máxima lograron seguir tomando carga y deformarse considerablemente antes de su fractura. Este tipo de comportamiento es sumamente beneficioso para estructuras sismo resistentes, debido a que las conexiones son las encargadas de disipar la energía. Los tornillos autoperforanes fallaron debido a la aparición de una grieta ubicada en la zona inferior del punto de aplicación de carga. Este comportamiento estaba previsto debido a que en dicha sección se desarrolla el máximo momento flector (Figura 4.1). En la figura 4.2 se presenta un resumen estadístico de los resultados experimentales mediante un gráfico de cajas.



Figura 4.1. Fallo a flexión en tornillos autoperforantes

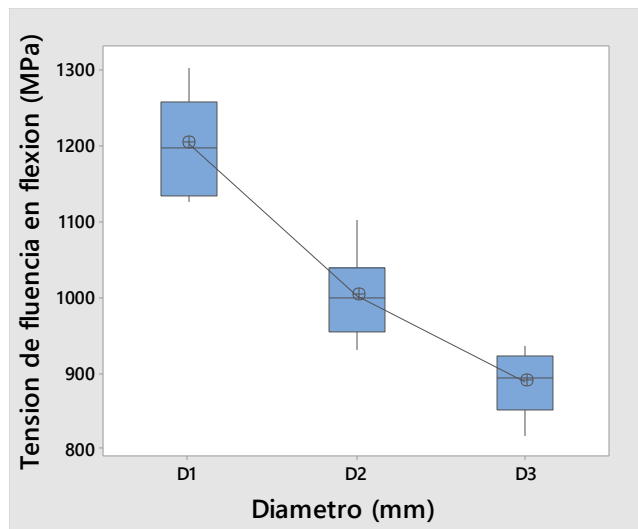


Figura 4.2 Gráfico de cajas tensión de fluencia en flexión tornillos autopercorantes

Tabla 4.1 Resumen Tensión de Fluencia en Tornillos Auto-perforantes experimental y teorica, MPa

Diámetro (mm)	Experimental (Mpa)	Desviación	Coef. De variación	Teórico (MPa)	Diferencia %
D1=2.8	1205.73	67.61	6%	733.6	39.15
D2=3.6	995.09	37.9	4%	687.7	30.21
D3=4.11	884.71	54.5	5%	657.2	26.05

En la tabla 4.1 se puede observar que los promedios de tensión de fluencia en flexión experimental, para cada diámetro, corroboran lo estipulado en la teoría. A medida que el diámetro del conector disminuye, su tensión de fluencia aumenta. El análisis de varianza (ANOVA) para el factor diámetro en la tensión de fluencia en el acero, rechaza la hipótesis nula ($p > 0.05$). Demostrando de esta manera, que al menos el promedio de la tensión de fluencia en un diámetro, es significativamente distinto a los demás. El método de Tukey para la comparación múltiple de medias de niveles, respondió intervalos de confianza positivos, para las comparaciones: D1-D2, D1-D3 y D2-D3. Por lo tanto, los resultados del análisis corroboran la incidencia del diámetro en la tensión de fluencia de los tornillos auto-perforantes, teniendo mayor incidencia al disminuir el diámetro de estos.

Al realizar una comparación de la tensión de fluencia experimental y la estipulada por la NCh 1198 mostrada en la tabla 4.1, se puede observar que los resultados empíricos en promedio son significativamente mayores, en comparación a lo estipulado por la normativa NCh 1198.

La tensión de fluencia, en promedio para tornillos de diámetro 2.8 mm, difiere en un 39.15% con lo estipulado en la normativa, mientras que los tornillos de diámetro 3.6 mm presentan una diferencia de 30.94% y los tornillos de diámetro 4.11 mm mostraron una diferencia de 25.66%.

4.2 Resistencia al aplastamiento bajo la acción de tornillos auto-perforantes.

El ensayo fue aplicado a 84 muestras, realizando siete repeticiones para cada combinación (especie, diámetro y dirección de fibra) con el fin de caracterizar la resistencia al aplastamiento da como resultado, un registro de carga-desplazamiento. Con el registro se es posible obtener una gráfica del comportamiento de la probeta ante el aplastamiento. Gracias a esta grafica se puede estimar la carga de fluencia mediante el método del 5% de desplazamiento. La carga de fluencia y la ecuación 3.3 nos permite caracterizar la resistencia al aplastamiento en la madera. Las probetas de madera fallaron debido a la fluencia dominada por el aplastamiento de las fibras de madera en contacto con el medio de unión (Figura 4.3). En el Anexo c se presenta con mayor detalle el fallo producido en las probetas de madera para cada tipo de configuración estudiada. A continuación, en la figura 4.4 y Figura 4.5 se presentan un resumen de los gráficos obtenidos a través del registro carga-desplazamiento.



Figura 4.3. Fallo típico de probeta producto del ensayo de resistencia al aplastamiento.

Al igual que en ensayo anterior, se utilizó el software Excel aplicar el método de %5 de desplazamiento y obtener la carga de fluencia. Posteriormente, se estimó la resistencia al aplastamiento. En las figuras 4.6 y 4.7 se presenta un resumen estadístico de la resistencia al aplastamiento para las distintas configuraciones de probetas, mediante gráficos de caja.

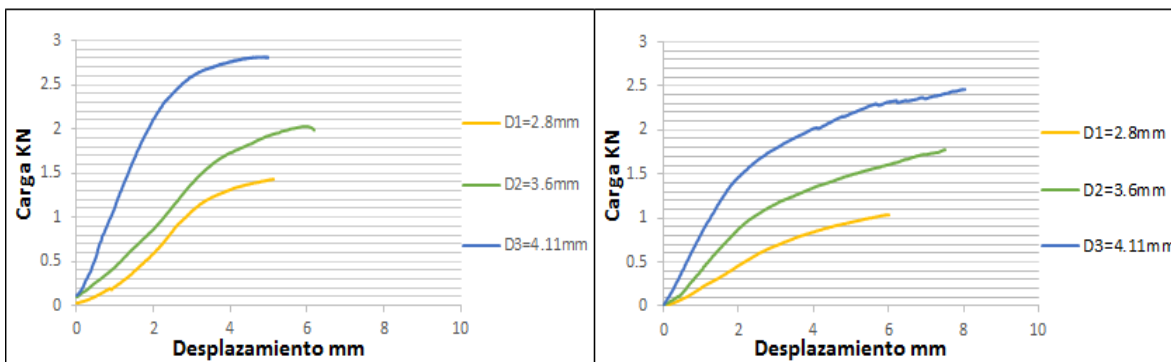


Figura 4.4. Gráficos del ensayo resistencia al aplastamiento en pino radiata, con carga perpendicular y paralela

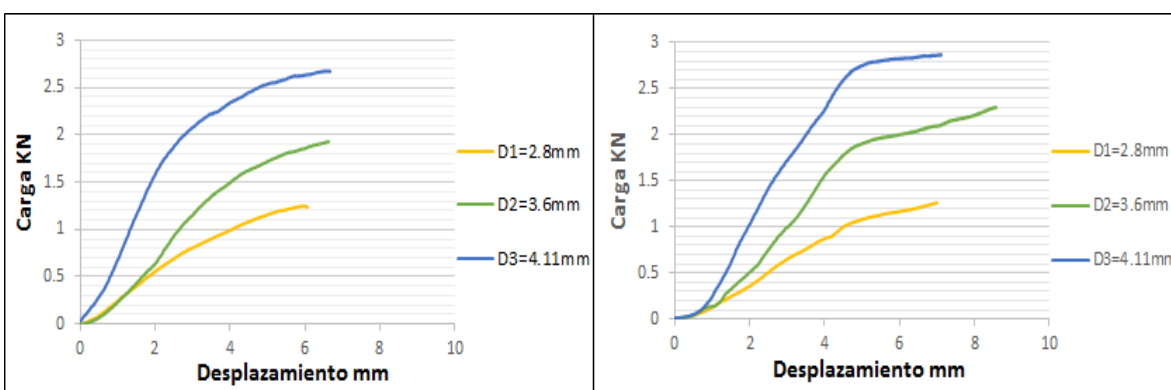


Figura 4.5. Gráficos del ensayo resistencia al aplastamiento en raulí, con carga perpendicular y paralela

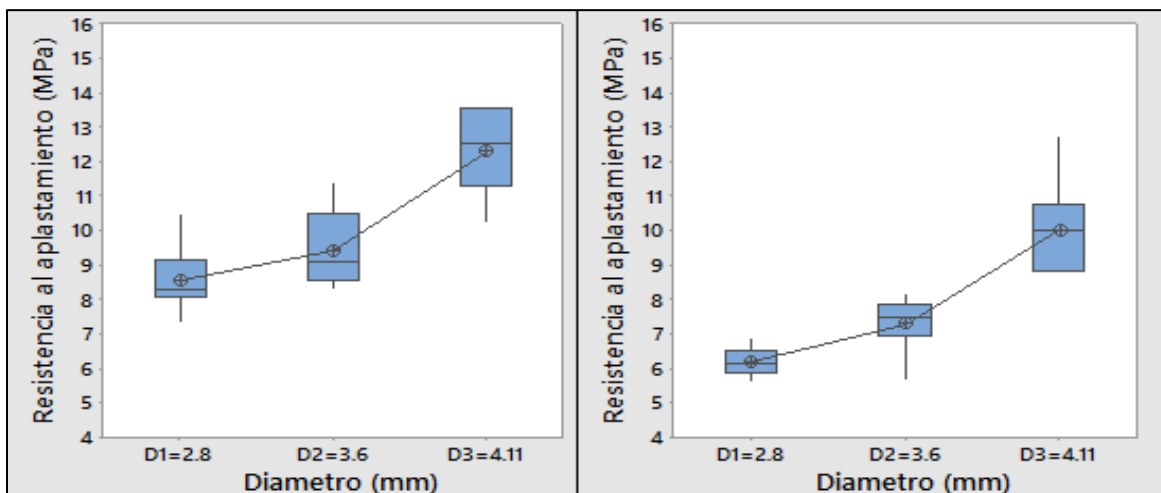


Figura 4.6. Gráficos de caja resistencia al aplastamiento en Pino Radiata en carga paralela y perpendicular.

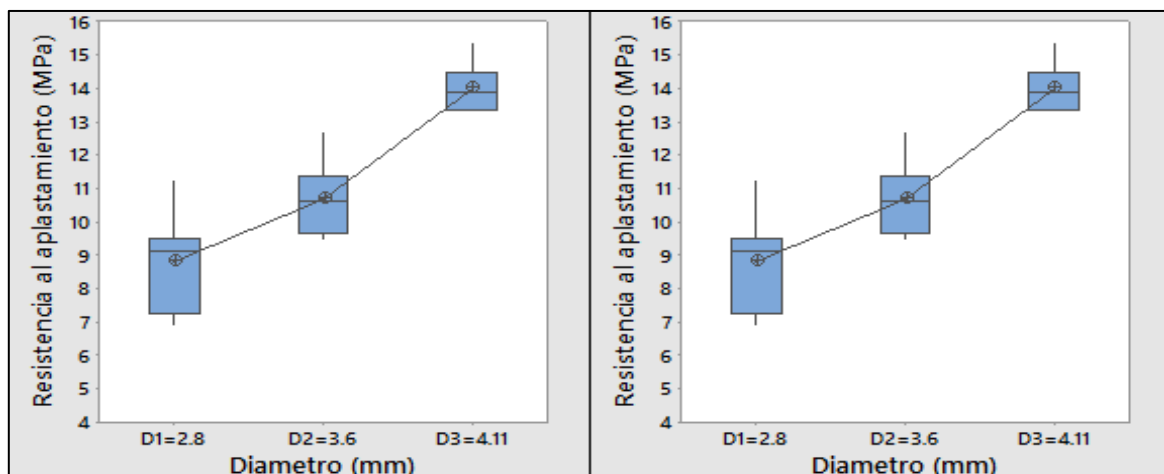


Figura 4.7. Gráficos de caja resistencia al aplastamiento en Pino Radiata en carga paralela y perpendicular

4.2.1 Influencia del diámetro en la resistencia al aplastamiento.

El análisis de varianza nos indica que la media de la resistencia al aplastamiento de uno de los niveles (D1, D2 y D3) difiere significativamente de las otras con un 95% de confianza, tanto como para el pino y raulí, en carga perpendicular y paralela. Para identificar el o los niveles que interfieren de manera significativa, se realizó un análisis de medias entre niveles mediante el método de Tukey. Los resultados del método de Tukey nos indica que en las comparaciones donde el intervalo de confianza se incluye el 0, no existe una diferencia significativa entre las medias. La resistencia al aplastamiento en el pino radiata, tanto en carga perpendicular y paralela, presentaron un intervalo de confianza (D2-D1) en presencia del 0. Por lo cual, no existe una diferencia significativa entre dichos niveles, pero si entre los diámetros D3-D1 y D3-D2, siendo menor para la última comparación. Bajo esta condición se puede inferir que los resultados experimentales demuestran una correlación entre la resistencia al aplastamiento y el diámetro del tornillo auto-perforante para el pino radiata en condiciones de carga perpendicular y paralelo a la fibra. Los resultados para el análisis entre medias de niveles para el raulí, establecen una diferencia significativa entre niveles, siendo mayor para el intervalo D1-D3.

Los resultados experimentales difieren a lo estipulado en la normativa NCh 1198, en la cual la resistencia al aplastamiento para conectores de diámetro menor a 6.4 mm sólo tiene incidencia la densidad. Estos resultados no solo difieren con la normativa nacional, sino que también con estudios experimentales de renombre en la resistencia al aplastamiento en la

madera, en los cuales se ha utilizado otros medios de unión como clavos y pasadores (Soltis (1987), Wilkinson (1991), Ehlbeck & Werner (1992) y Sawata & Yasumura (2002)).

4.2.2 Influencia de la dirección de la carga en la resistencia al aplastamiento.

Los resultados producto del análisis de varianza reportan que existe una diferencia significativa en la variable estudio (resistencia al aplastamiento), ante los niveles evaluados (dirección de carga perpendicular y paralela). Tanto la madera pino radiata como el raulí tiene una resistencia al aplastamiento mayor para cargas paralelas a la fibra de madera y menores para cargas perpendiculares. La resistencia al aplastamiento del pino radiata presento una diferencia de 22% entre la condición de carga paralela y perpendicular, mientras que el raulí presento una diferencia de un 14%. Los resultados experimentales difieren a la ecuación de diseño de la normativa NCh1198 en la cual se asigna una resistencia al aplastamiento que es independiente de la dirección de la carga.

4.2.3 Influencia de la densidad en la resistencia al aplastamiento.

Para realizar un análisis de la densidad se comparará los resultados obtenidos de la resistencia al aplastamiento del pino radiata (menor densidad, Anexo A) con el raulí. Los resultados obtenidos a través del análisis de varianza para carga perpendicular nos indica que existe una diferencia significativa entre la media de los niveles (raulí y pino), por lo tanto, en base a los resultados se puede afirmar que la densidad es un factor incidente en la resistencia al aplastamiento en cargas perpendiculares a la fibra. No obstante, los resultados obtenidos para las pruebas de carga paralela indican que, a pesar que existe una diferencia entre los resultados, esta no es significativa. A continuación, en las tablas 4.5 y 4.6 se presenta una comparación de la resistencia al aplastamiento promedio producto de los ensayos experimentales con la resistencia al aplastamiento teórico según la normativa NCh 1198. La resistencia al aplastamiento teórica se calculó teniendo en cuenta el valor medio de la densidad anhidra propuesta por la normativa NCh 1198, siendo 450 kg/m^3 para la especie Pino radiata y 510 kg/m^3 para el raulí.

Tabla 4.3 “Comparación entre resultados teóricos (NCh 1198) y experimentales para la resistencia promedio al aplastamiento paralelo”

D(mm)	R _{ap} Experimental (MPa)			R _{ap} NCh 1198(Mpa)	Diferencias %		
	D1=2.8	D2=3.6	D3=4.11	Densidad: 450, 510 (kg/ m ³)	D1=2.8	D2=3.6	D3=4.11
Pino	8.534	9.393	12.278	26.46	67.74	64.50	53.60
Raulí	8.797	10.693	13.995	33.31	75.59	67.90	57.99

Tabla 4.4 Comparación entre Resultados Teóricos (NCh 1198) y experimentales para la resistencia promedio al Aplastamiento Perpendicular”

D(mm)	R _{ap} Experimental (MPa)			R _{ap} NCh 1198 (Mpa)	Diferencias %		
	D1=2.8	D2=3.6	D3=4.11	Densidad: 450, 510 (kg/ m ³)	D1=2.8	D2=3.6	D3=4.11
Pino	6.167	7.278	9.992	26.46	76.69	72.49	62.23
Raulí	7.492	9.667	11.265	33.31	77.50	70.98	66.18

Como se puede apreciar en las tablas 4.19 y 4.20, existe una gran diferencia entre los resultados teóricos obtenidos bajo el criterio de diseño de la normativa NCh 1198 y los resultados obtenidos experimentalmente. La resistencia al aplastamiento paralelo del pino radiata es entre 53% y 67 % menor a lo estipulado teóricamente; mientras que en condiciones de carga perpendicular esta diferencia aumenta entre 62 y 76%. Por otro lado, los resultados obtenidos para el raulí presentan una diferencia similar, variando entre 58% y 76% para cargas paralelas a la fibra y entre 66% y 77% para cargas perpendiculares.

Capítulo 5: Conclusiones.

En este capítulo se presenta de forma concisa las ideas más relevantes derivadas del análisis de capítulo 4, dando respuesta de esta manera, a los objetivos de este trabajo de investigación.

5.1 Conclusiones relacionadas con la evaluación de la tensión de fluencia en flexión de tornillos autoperforantes.

Los ensayos experimentales realizados para la caracterización de la tensión de fluencia en tornillos auto perforantes se desarrollaron con éxito. La instrumentación y equipamiento implementados en el laboratorio permitieron desarrollar los experimentos conformes a los protocolos del ensayo ASTM F1575. De esta forma se logró que los tornillos autoperforantes desarrollaran su máxima capacidad a flexión, fallando por la aparición de una fisura en la zona inferior del punto de aplicación de carga.

Los tornillos auto perforantes desarrollaron una tensión de fluencia a flexión entre un 25% a 30% mayor a los valores obtenidos a través de la ecuación de la normativa NCh 1198, presentando una mayor diferencia en los tornillos de menor diámetro. Los resultados obtenidos a través del análisis estadístico indican que existe una relación inversamente proporcional entre el diámetro y la tensión de fluencia a flexión.

5.2 Conclusiones relacionadas con la evaluación de la resistencia al aplastamiento en la madera.

Los ensayos experimentales realizados para la caracterización de la resistencia al aplastamiento en la madera, utilizando tornillos autoperforantes como medios de unión, se desarrollaron con éxito. La instrumentación y equipamiento implementados en el laboratorio permitieron que los ensayos se realizaran según los protocolos del ensayo ASTM D5764. De esta manera se obtuvo la resistencia al aplastamiento en la madera, la cual fallo por un aplastamiento en las fibras de madera, en la superficie de contacto con el tornillo autoperforante.

Los resultados experimentales muestran que las probetas de madera desarrollaron una resistencia al aplastamiento menor a la estipulada en la normativa NCh 1198. En el caso de la especie pino radiata se halló una diferencia entre un 53% a 76%, mientras que para la especie raulí se halló una diferencia entre un 58% a 77%.

La resistencia al aplastamiento encontrada en condiciones de carga paralela a la fibra de madera fue mayor a la hallada en dirección perpendicular. La especie pino radiata desarrollo una resistencia al aplastamiento en condiciones de carga paralela un 20% mayor que en condiciones de carga perpendicular, mientras que para la especie raulí se halló una diferencia de un 14%.

Los resultados de los análisis estadísticos evidencian una correlación directamente proporcional entre la resistencia al aplastamiento y el diámetro de los tornillos autoperforantes.

Los resultados experimentales demuestran una relación entre la resistencia al aplastamiento y la densidad de la madera, en condiciones de carga perpendicular. Esto no se logro demostrar en condiciones de carga paralela.

5.1 Futuras investigaciones.

Dada la controversia generada entre los resultados experimentales y los criterios de la normativa, son numerosas las interrogantes que surgen ante el análisis de los resultados. Por otro lado, la numerosa cuantía de factores incidentes en los parámetros estudiados y la gran variedad de sistemas de conexión tipo clavija, hacen que sea necesario el desarrollo de futuras investigaciones para consolidar la confiabilidad de las uniones tipo clavija. A continuación, se presentan los tópicos más relevantes que deben seguir futuros proyectos de investigación con la misma línea de trabajo:

- Realizar investigaciones similares integrando un espectro más amplio de especies de madera. Integrar el uso de distintos medios de unión tipo clavija, con el fin de contrastar su comportamiento con el de los tornillos autoperforantes. Se aconseja

colocar énfasis en el comportamiento de la resistencia al aplastamiento para medios de unión con diámetros mayor a 6.4 mm.

- Desarrollar programas experimentales para conexiones de madera sometidas a carga lateral, utilizando la caracterización de los parámetros de este estudio, con el fin de estudiar las ecuaciones propuestas en la NCh 1198 (tabla 2.14).
- Desarrollar estudios para la resistencia al aplastamiento en maderas contrachapada y maderas laminadas.
- Investigar la incidencia del contenido de humedad en la resistencia al aplastamiento.
- Estudiar la capacidad portante adicional debido a la fricción entre los elementos de unión.
- Investigar los procesos de fabricación y la calidad del acero utilizados para la confección de los tornillos autoperforantes en nuestro país. Realizar ensayos a flexión para barras lisas con distinto diámetro y la misma calidad de acero utilizado en la fabricación de los tornillos, para ver la incidencia de estos factores en la tensión de fluencia.

Bibliografía

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.

Aune P. & Patton-Mallory M. (1986) Lateral load-bearing capacity of nailed joints based on the yield theory. Theoretical development and experimental verification. US Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, Research Papers FPL 469-470.

Blaß H.J. & Görlacher R. (1996) Visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung von Vollholz. Mikado 5:64-71.

Coronel E. O. (1994) Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 1º parte: Fundamentos de las propiedades físicas de las maderas. Instituto de Tecnología de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina.

Ehlbeck, J. Load-carrying capacity and deformation characteristics of nailed joints. Bordeaux, France: International Council for Building Research Studies and Documentation, Working Commission W18—Timber Structures; October 1979.

Ehlbeck J. & Werner H. (1992) Softwood and hardwood embedding strength for dowel-type fasteners. Background of the formulae in Eurocode 5, draft April 1992. Proceedings, CIB - W18A, Meeting Åhus, Sweden. Paper 25-7-2.

Harding, N and Fowkes, AHR. Bolted Timber Joints. In: Proceedings, Pacific Timber Engineering Conference, 3872-883, 1984.

Hoffmeyer P. (1995) Wood as a building material. Timber Engineering STEP 1, pp A4/1A4/21. Centrum Hout, The Netherlands.

Instituto Nacional de Normalización. 2007. NCh 1198: Madera – Construcciones en madera – Cálculo. 213p.

Instituto Nacional de Normalización (INN). 1986. NCh194: Ensayo de compresión perpendicular.

Instituto Nacional de Normalización (INN). 2003. NCh176/1: Madera Parte1- Determinación del contenido de humedad

Instituto Nacional de Normalización (INN). 2003. NCh176/1: Madera Parte2- Determinación de la densidad.

Instituto Nacional de Normalización (INN). 1986. NCh 973: Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de compresión paralela

Instituto Nacional de Normalización (INN). 1986. NCh 975: Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de tracción perpendicular a las fibras

Instituto Nacional de Normalización (INN). 1986. Ensayo de compresión paralela. NCh193

Instituto Nacional de Normalización (INN). 1986. Madera: determinación de propiedades mecánicas. NCh 987

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

Jorissen A. (1998) Double shear timber connections with dowel type fasteners. Doctoral Thesis. Delft University Press, Delft, The Netherlands. 264 p.

Kharouf N., McClure G., Smith I. (2003) Elasto-plastic modeling of wood bolted connections. *Computers and Structures* 81: 747-754.

Larsen, H. J.; Reestrup, V. Tests on screws in wood. *Bygningsstatiska Meddelelser*. 1: 3-36; 1969.

Larsen, H. J. The yield load of bolted and nailed joints. In: *Proceedings, International Union of Forestry Research Organizations working group on structural utilization; 1973 September/October*. Pretoria, Republic of South Africa; [n.d.].

Larsen H.J. & Jensen J.L. (2000). Influence of semirigidity of joints on the behaviour of timber structures. *Progress In Structural Engineering And Materials*, 267-277.

Meyer A. (1957) Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 15 Jg. Heft 2, S. 96-109.

Möller T. (1951) En ny metod för beräkning av spikförband. Report N° 117. Chalmers University of Technology, Sweden.

Norén, B. Nailed joints-their strength and rigidity under short-term and long-term loading. Rep. 22. Stockholm: The National Swedish Institute for Building Research, Box 27 163, 102 52; 1968.

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

Rammer DR, Winistorfer SG (2001) Effect of moisture content on dowel-bearing strength. *Wood Fiber Sci* 33:126-139.

Rodd, P. D. (1973). The analysis of timber joints made with circular dowel connectors. Ph.D. thesis, University of Sussex, England.

Sawata K, Yasumura M (2002) Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners. *J Wood Sci* 48:138–146.

Soltis LA, Karnasudirdja S, Little JK (1987) Angle to grain strength of dowel-type fasteners. *Wood Fiber Sci* 19:68–80.

Standards Association of Australia (1986) AS 2878-1986, Timber - Classification into strength groups. Standards Association of Australia, North Sydney, N.S.W.

UNE-EN 338 (2010). Madera estructural. Clases resistentes. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 8.

UNE-EN 384: 2010. “Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad”.

Wilkinson. T. L. (1991). " Dowel bearing strength ... USDA Forest Service Res. Paper FPL-RP-505. Forest Prod. Lah . Madison. Wi s.

APÉNDICE A: RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el siguiente apéndice se presentan los resultados obtenidos a través de los ensayos “Tensión de fluencia en el acero” y “Resistencia al aplastamiento en la madera”, así como también las principales propiedades de las probetas (masa, dimensión y densidad) que se utilizaron para el cálculo de los resultados teóricos y experimentales.

Propiedades probetas de ensayo

Las dimensiones para las probetas fueron constantes tanto como para el pino radiata y raulí, (ancho x largo x alto) de 45mm x 50mm x 100mm.

Tabla A.1. Propiedades probetas de pino radiata, utilizadas en Carga Paralela

D íámetro (mm)	Muestra	Masa (kg)	Densidad (kg/m ³)
D1=2.8	1	0.086	400
	2	0.089	413.95
	3	0.087	404.65
	4	0.089	413.95
	5	0.0865	402.32
	6	0.0865	402.32
	7	0.086	400
D2=3.6	1	0.086	400
	2	0.088	409.30
	3	0.0883	410.46
	4	0.091	423.25
	5	0.0855	397.67
	6	0.088	409.30
	7	0.0855	397.67
D3=4.11	1	0.0855	397.67
	2	0.087	409.30
	3	0.083	410.46
	4	0.0855	423.25
	5	0.087	397.67
	6	0.081	409.30
	7	0.0865	397.67

Tabla A.2. Propiedades probetas de pino Radiata, en Carga Perpendicular

D íámetro (mm)	Muestra	Masa (kg)	Densidad (kg/m ³)
D1=2.8	1	0.0935	434.88
	2	0.084	390.69
	3	0.0865	402.32
	4	0.094	437.2
	5	0.0835	388.37
	6	0.0835	3.88.37
	7	0.082	381.39
D2=3.6	1	0.0885	411.62
	2	0.084	390.69
	3	0.081	376.74
	4	0.0825	383.72
	5	0.0802	373.02
	6	0.0805	374.4
	7	0.0825	3.83.72
D3=4.11	1	0.0825	383.72
	2	0.082	381.39
	3	0.0895	416.27
	4	0.083	386.04
	5	0.084	390.69
	6	0.0825	383.72
	7	0.089	413.95

Tabla A.3. Propiedades probetas de raulí, en Carga Paralela

D íámetro (mm)	Muestra	Masa (gr)	Densidad (kg/m ³)
D1=2.8	1	0.188	548.83
	2	0.115	534.88
	3	0.1105	513.95
	4	0.1185	551.16
	5	0.1105	513.95
	6	0.1155	537.02
	7	0.1125	523.25
D2=3.6	1	0.118	548.83
	2	0.1115	518.60
	3	0.1105	513.95
	4	0.1185	551.16
	5	0.1105	513.95
	6	0.1155	537.2
	7	0.1125	523.25
D3=4.11	1	0.113	525.58
	2	0.1145	532.55
	3	0.1165	541.86
	4	0.1125	523.25
	5	0.1135	527.90
	6	0.113	525.58
	7	0.118	548.83

Tabla A.4. Propiedades probetas de raulí, en Carga Perpendicular

D íámetro (mm)	Muestra	Masa (gr)	Densidad (kg/m ³)
D1=2.8	1	0.1095	509.30
	2	0.11	511.62
	3	0.1115	518.60
	4	0.1115	518.60
	5	0.1045	486.04
	6	0.114	523.23
	7	0.1095	509.30
D2=3.6	1	0.108	502.32
	2	0.1055	490.69
	3	0.115	534.88
	4	0.1035	481.39
	5	0.1105	513.95
	6	0.1115	518.60
	7	0.1175	546.51
D3=4.11	1	0.102	474.41
	2	0.1115	518.60
	3	0.1115	518.60
	4	0.1115	518.60
	5	0.1115	537.20
	6	0.11	511.62
	7	0.108	502.32

Curvas Carga Desplazamiento

A continuación, se presentan las curvas carga vs desplazamiento obtenidas a través de los ensayos de Resistencia al aplastamiento y tensión de fluencia en flexión.

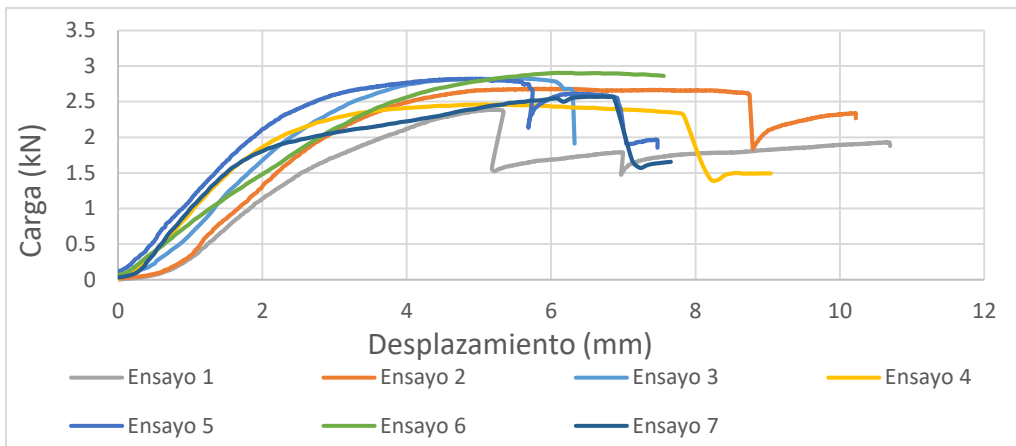


Figura A.1 “Resistencia al aplastamiento pino radiata en carga paralela con tornillos de diámetro 4.11 mm”

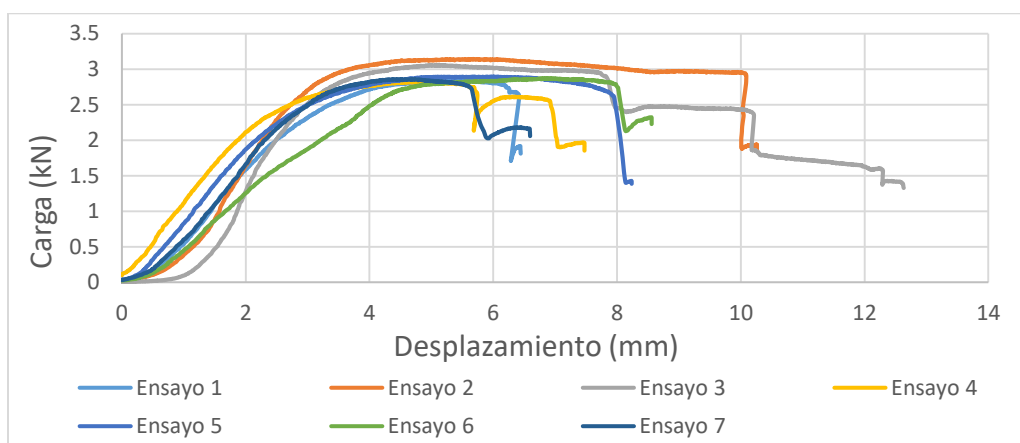


Figura A.2 “Resistencia al aplastamiento Raulí en carga paralela con tornillos de diámetro 4.11 mm”

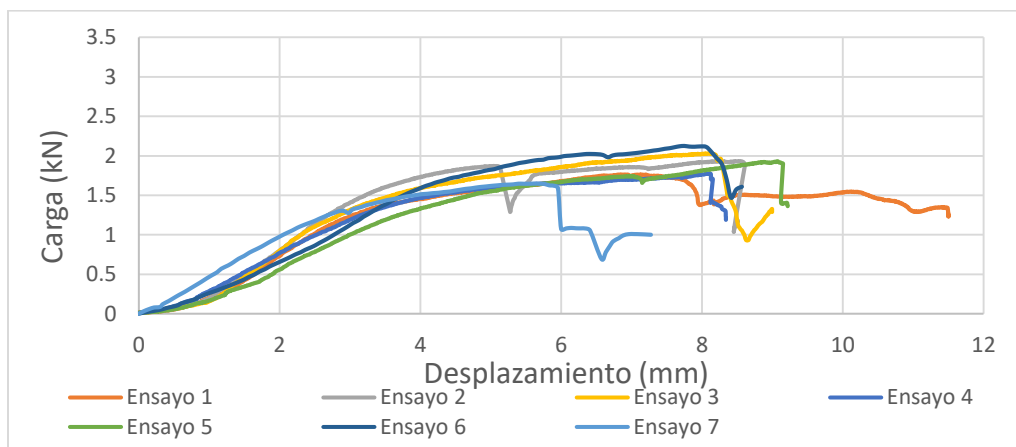


Figura A.3 “Resistencia al aplastamiento pino radiata en carga paralela con tornillos de diámetro 3.6 mm”

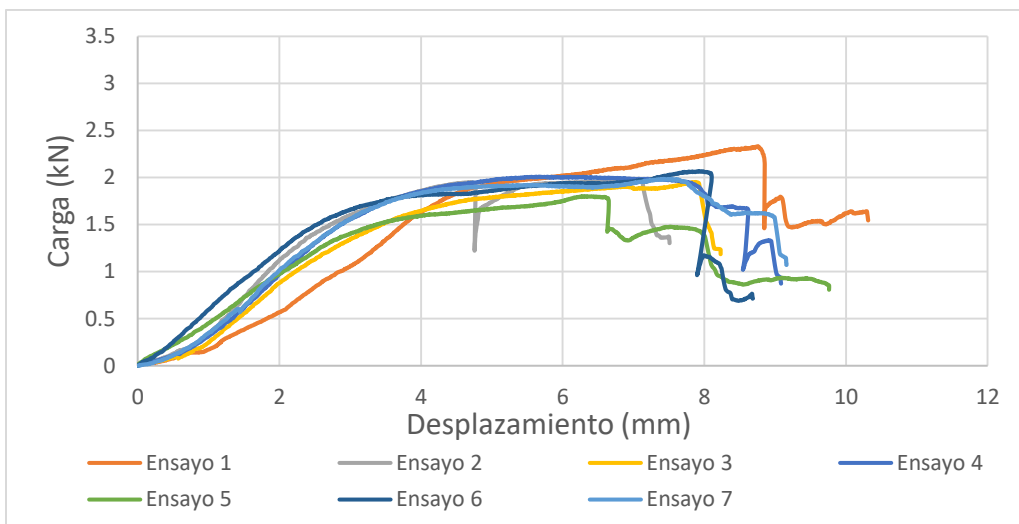


Figura A.4 “Resistencia al aplastamiento en Raulí en carga paralela con tornillos de diámetro 3.6mm”

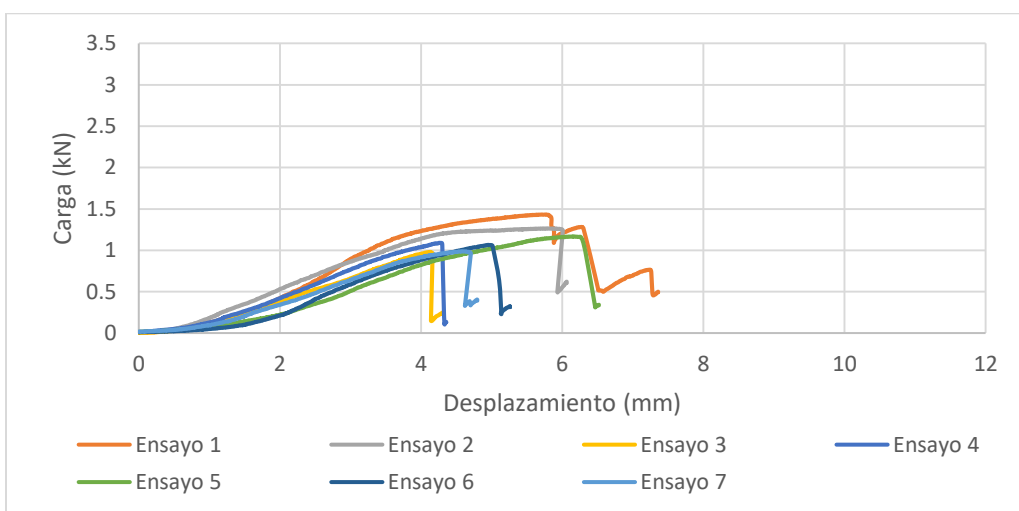


Figura A.5 “Resistencia al aplastamiento pino radiata en carga paralela con tornillos de diámetro 2.8 mm”

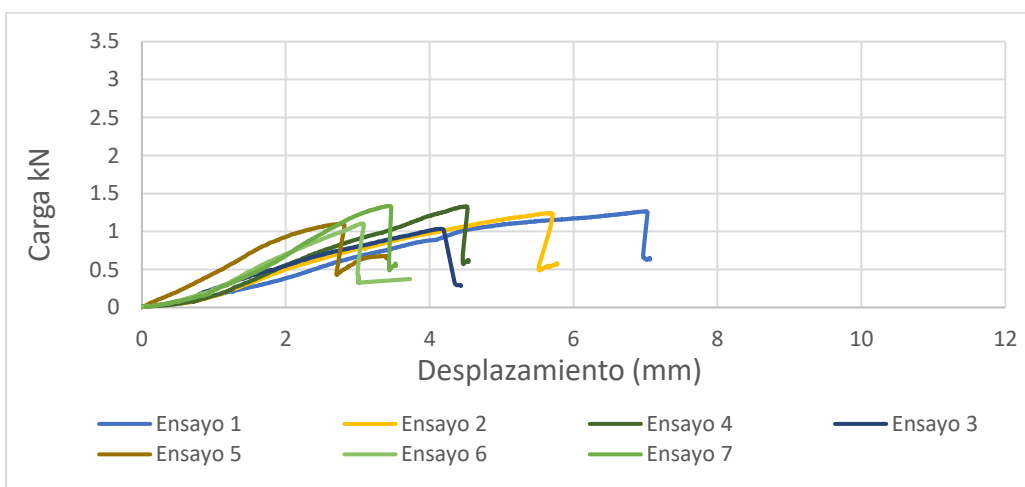


Figura A.6 “Resistencia al aplastamiento en Raulí en carga paralela con tornillos de diámetro 2.8 mm”

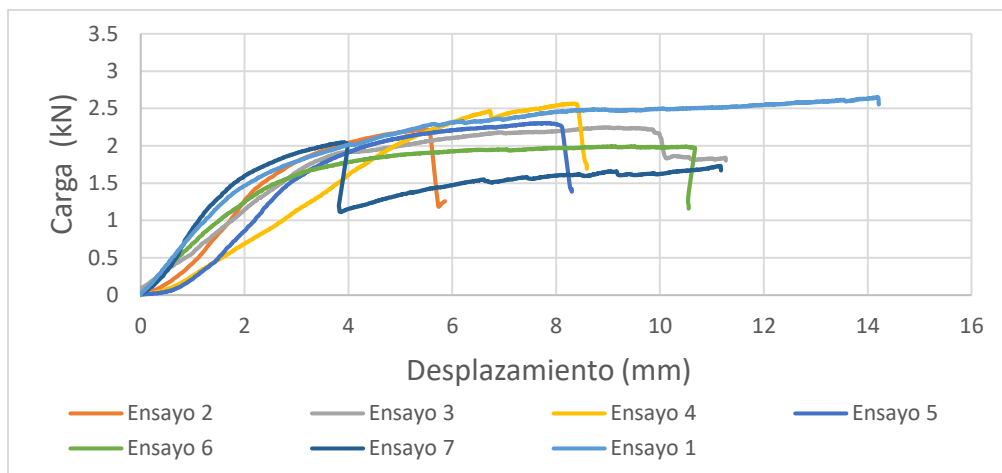


Figura A7 “Resistencia al aplastamiento pino radiata en carga perpendicular con tornillos de diámetro 4.11 mm”

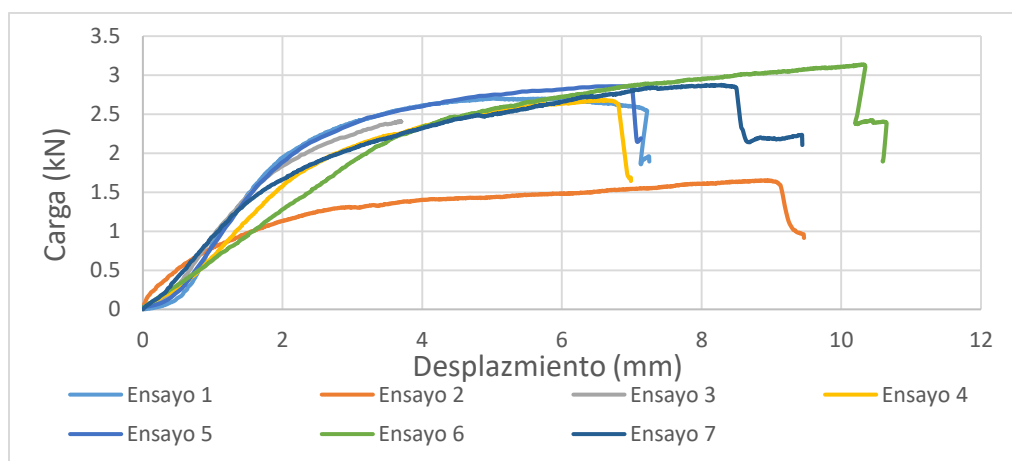


Figura A.8 “Resistencia al aplastamiento en Rauli en carga perpendicular con tornillos de diámetro 4.11 mm”

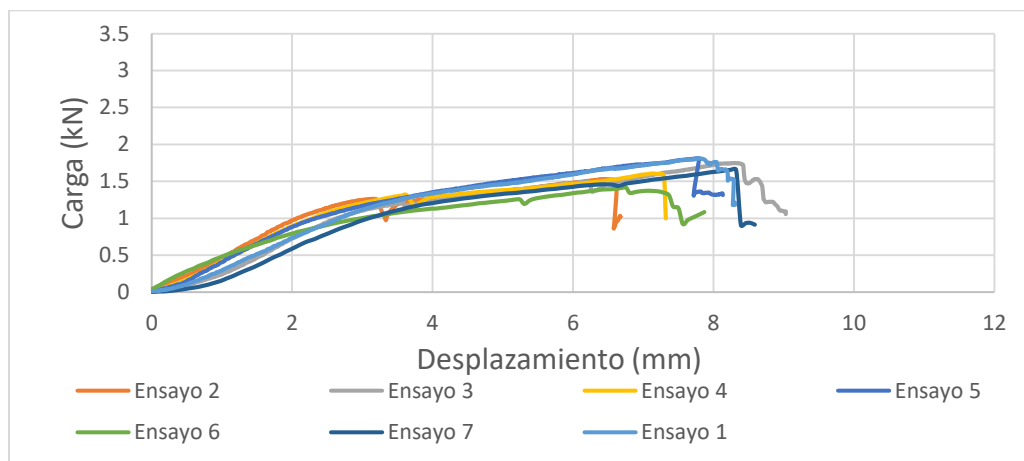


Figura A9 “Resistencia al aplastamiento pino radiata en carga perpendicular con tornillos de diámetro 3.6 mm”

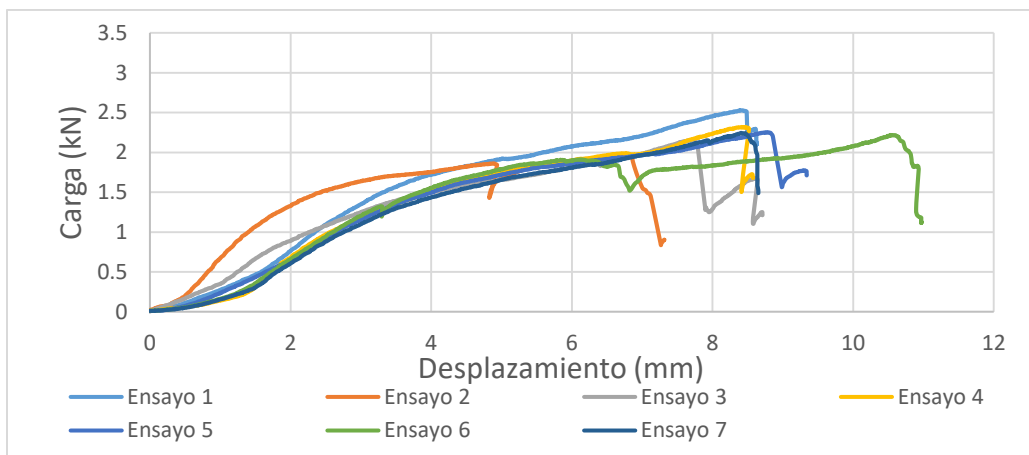


Figura A.10 “Resistencia al aplastamiento en Rauli en carga perpendicular con tornillos de diámetro 3.6 mm”

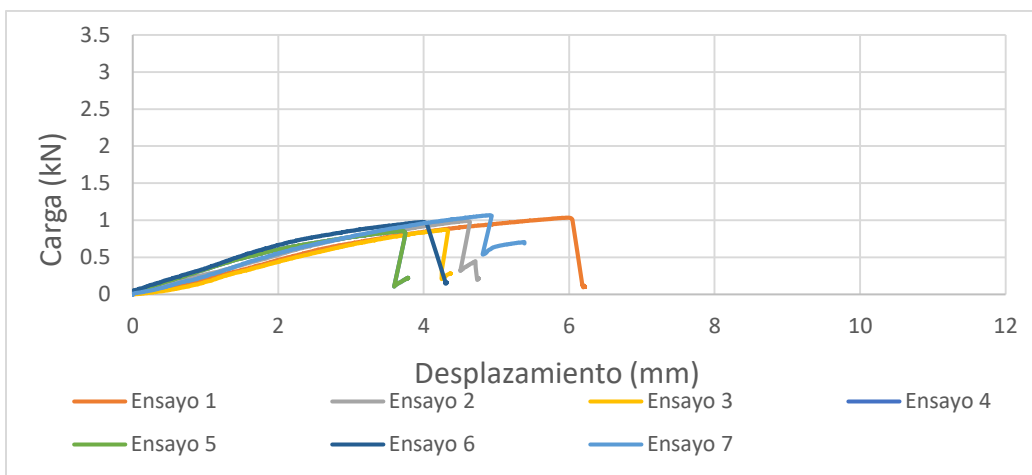


Figura A.11 “Resistencia al aplastamiento para pino radiata en carga perpendicular con tornillos de diámetro 2.8 mm”

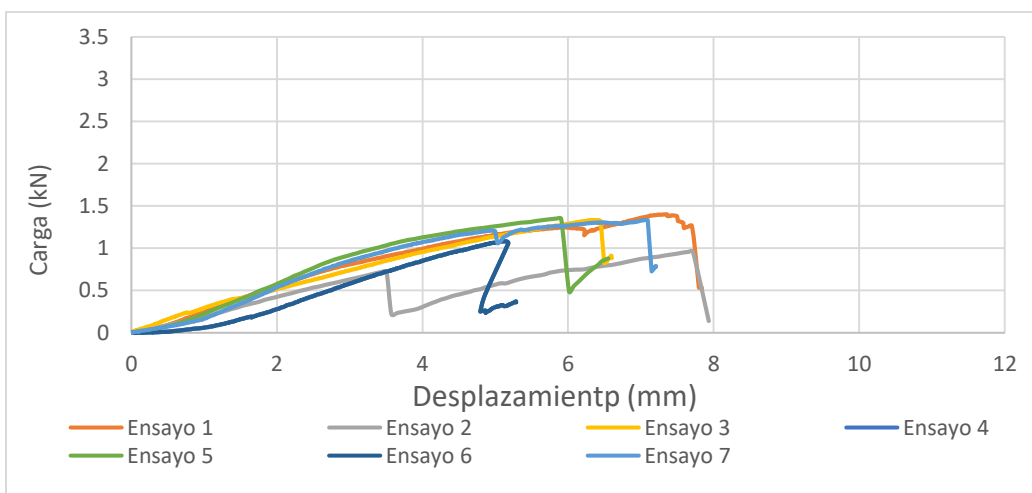


Figura A.12 “Resistencia al aplastamiento para Rauli en carga perpendicular con tornillos de diámetro 2.8 mm”

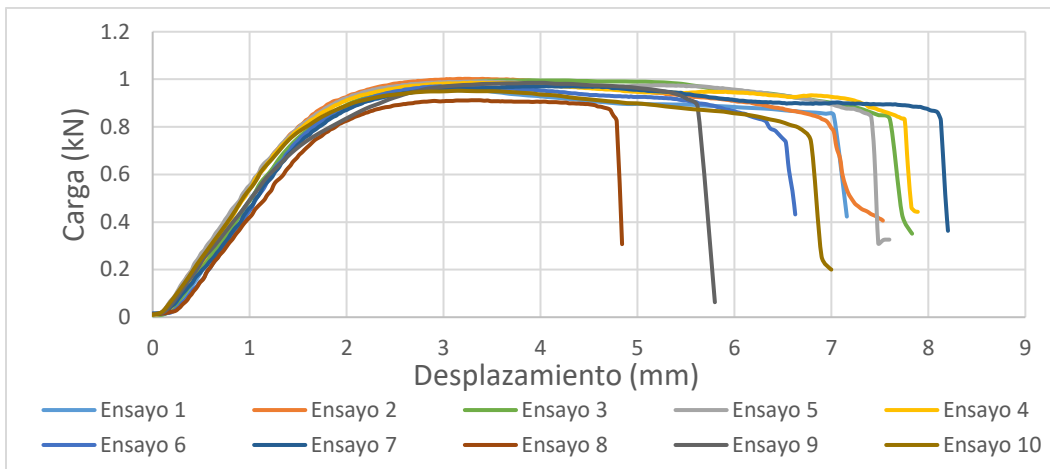


Figura A.13. "tensión de fluencia en flexion en tornillos auto perforantes de diámetro 4.11 mm"

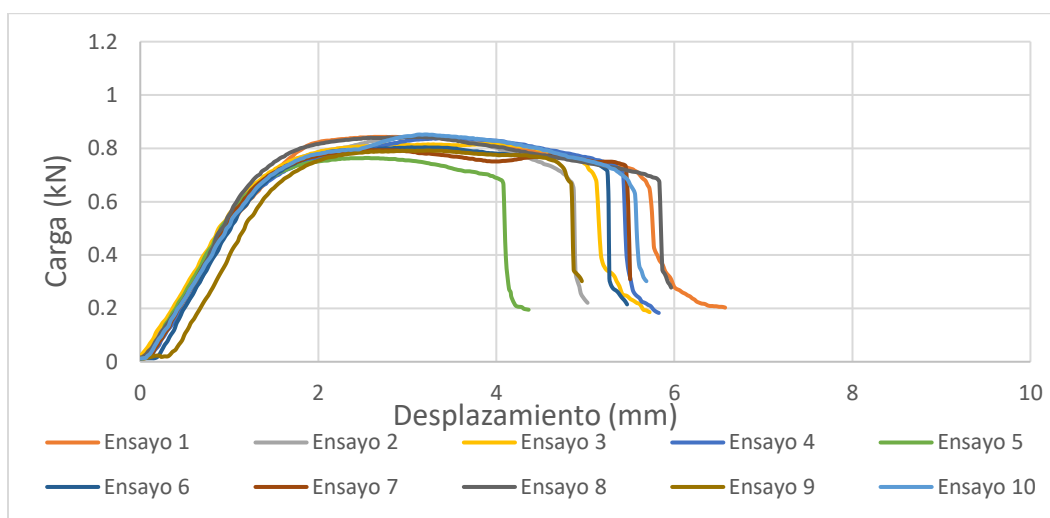


Figura A.14. "tensión de fluencia en flexion en tornillos auto perforantes de 3.6 mm"

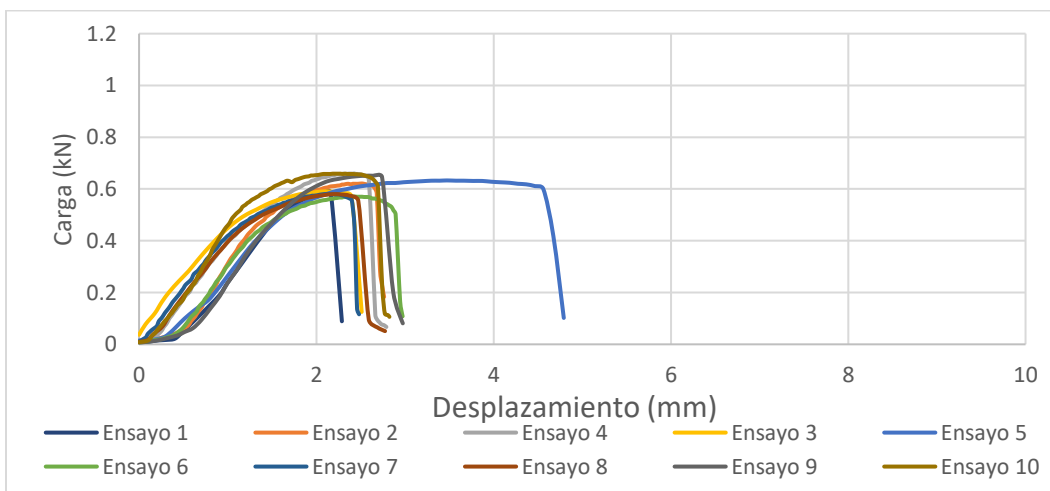


Figura A.15. "tensión de fluencia en flexión en tornillos auto perforantes de 2.8 mm"

Resistencia al Aplastamiento

Tabla A.5. Resistencia al Aplastamiento para Pino Radiata, en Carga Paralela

D íámetro (mm)	Muestra	Resistencia al aplastamiento (Mpa)
D1=2.8	1	10.499
	2	8.339
	3	8.261
	4	9.122
	5	8.115
	6	7.314
	7	8.089
D2=3.6	1	8.567
	2	10.481
	3	8.5943
	4	9.0896
	5	9.3038
	6	11.419
	7	8.299
D3=4.11	1	12.52309
	2	11.31533
	3	11.37396
	4	13.60185
	5	13.5315
	6	10.20139
	7	13.3966523

Tabla A.6. Resistencia al Aplastamiento para Pino Radiata, en Carga Perpendicular

Diámetro (mm)	Muestra	Resistencia al aplastamiento(MPa)
D1=2.8	1	5.873
	2	6.876
	3	5.963
	4	5.567
	5	6.506
	6	6.247
	7	6.138
D2=3.6	1	7.831
	2	7.309
	3	7.630
	4	6.907
	5	5.655
	6	7.449
	7	8.165
D3=4.11	1	10.00791
	2	10.72905
	3	12.72242
	4	10.07241
	5	8.788438
	6	8.800164
	7	8.823616

Tabla A.7. Resumen Estadístico de la Resistencia al Aplastamiento para Pino Radiata

Tornillo	Carga perpendicular (MPa)			Carga paralela (MPa)		
	Promedio	Desviación	Coef. De variación	Promedio	Desviación	Coef. De variación
D1=2.8	6.167	1.014	12%	8.534	0.430	7%
D2=3.6	7.278	1.147	12%	9.393	0.818	11%
D3=4.11	9.992	1.334	11%	12.277	1.428	14%

Tabla A.8. Resistencia al Aplastamiento para Raulí, en Carga Paralela

Diámetro (mm)	Muestra	Resistencia al aplastamiento(MPa)
D1=2.8	1	9.139
	2	6.884
	3	9.466
	4	7.228
	5	8.476
	6	9.122
	7	11.265
D2=3.6	1	12.690
	2	10.267
	3	9.410
	4	10.843
	5	9.586
	6	10.6158
	7	11.365
D3=4.11	1	15.360
	2	14.070
	3	13.894
	4	13.373
	5	13.308
	6	14.481
	7	13.478

Tabla A.9. Resistencia al Aplastamiento para Raulí, en Carga Perpendicular

Diámetro (mm)	Muestra	Resistencia al aplastamiento(MPa)
D1=2.8	1	6.973
	2	6.067
	3	9.165
	4	8.364
	5	8.356
	6	8.347
	7	8.321
D2=3.6	1	8.460
	2	9.297
	3	10.100
	4	9.805
	5	10.040
	6	8.795
	7	11.244
D3=4.11	1	9.996
	2	10.476
	3	11.286
	4	11.837
	5	13.461
	6	10.043
	7	11.760

Tabla A.10. Resumen Estadístico de la Resistencia al Aplastamiento para Raulí

Tornillo	Carga perpendicular (MPa)			Carga paralela (MPa)		
	Promedio	Desviación	Coef. de variación	Promedio	Desviación	Coef. de variación
D1=2.8	7.492	1.470	17%	8.797	1.049	13%
D2=3.6	9.667	1.108	10%	10.693	0.929	12%
D3=4.11	11.265	0.735	5%	13.995	1.114	10%

Tensión de Fluencia en el Acero

Tabla A.11. Tensión de Fluencia en Tornillos Auto-perforantes, MPa

N° muestra	D1=2.8 mm	D2=3.6 mm	D3=0.451 mm
1	1173.26	978.11	974.91
2	1254.49	1059.23	931.11
3	1206.21	1009.25	864.38
4	1240.95	962.05	860.21
5	1135.58	978.71	922.77
6	1125.88	930.12	869.59
7	1103.32	970.38	868.55
8	1301.87	1031.46	818.5
9	1249.98	1016.19	852.9
10	1265.77	1014.8	884.19

APÉNDICE B: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En el siguiente apéndice se presenta el análisis estadístico, aplicado a los resultados experimentales de los ensayos “Resistencia al aplastamiento en la madera” y “Tensión de fluencia en el acero. Este análisis estadístico, se hará con el fin de buscar alguna correlación de los factores en la variable estudio, de esta manera se podrá hacer una evaluación de los criterios de la normativa NCh 1198. El ensayo tensión de fluencia en el acero tiene el diámetro como único factor, el cual está compuesto por tres niveles: D1, D2 y D3. El ensayo resistencia al aplastamiento en la madera tiene tres factores a estudiar: diámetro del conector, dirección de carga y densidad. El factor diámetro contiene tres niveles (D1, D2 y D3), la dirección de la carga tiene dos niveles (paralela y perpendicular); mientras que el factor densidad contiene dos niveles (Raulí y Pino Radiata). Para estudiar la correlación entre los factores y la variable en estudio, se aplicará un análisis de varianza, mejor conocido como ANOVA. El análisis estadístico se llevará a cabo utilizando el programa Minitab.

Análisis de Varianza (ANOVA)

Un análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente. Para ejecutar un ANOVA, se debe tener una variable de respuesta continua y al menos un factor categórico con dos o más niveles. Los análisis ANOVA requieren datos de poblaciones que sigan una distribución aproximadamente normal con varianzas iguales entre los niveles de factores. Sin embargo, los procedimientos de ANOVA funcionan bastante bien incluso cuando se viola el supuesto de normalidad, a menos que una o más de las distribuciones sean muy asimétricas o si las varianzas son bastante diferentes. Las transformaciones del conjunto de datos original pueden corregir estas violaciones. El análisis ANOVA solo otorga la información, de que si al menos uno de los niveles tiene una media diferente a las demás, es por esto, que en los casos donde la hipótesis nula es rechazada, es necesario incurrir al método de Tukey. El método de Tukey se utiliza en ANOVA para crear intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores mientras controla la tasa de error por familia que especifique. Antes de aplicar el test ANOVA es necesario verificar que los datos tengan una distribución normal y que las varianzas sean iguales, para ello se utilizara la prueba Kolmogorov-Smirnov y la prueba Barlett respectivamente.

Prueba de Normalidad Kolmogorov-Smirnov

Se aplicó una prueba de normalidad con un nivel de confiabilidad de 95%, a la Tensión de fluencia en el acero y a la resistencia al aplastamiento. A continuación, en la figura B.1 y B.2, se muestran los resultados obtenidos.

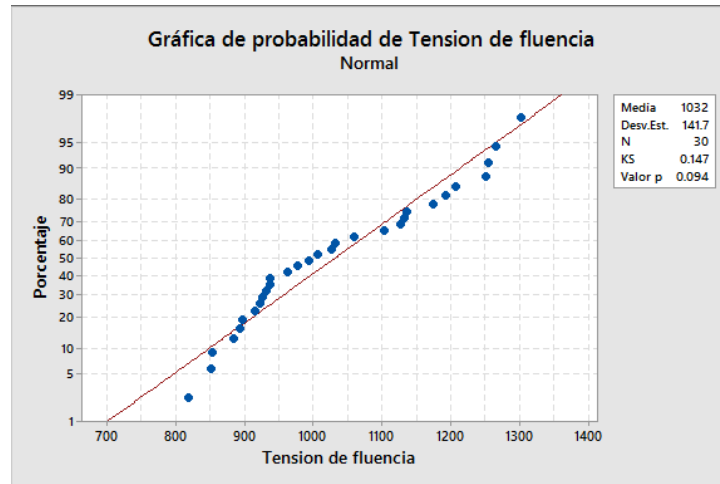


Figura B.1 Prueba de normalidad para la tensión de fluencia en el acero

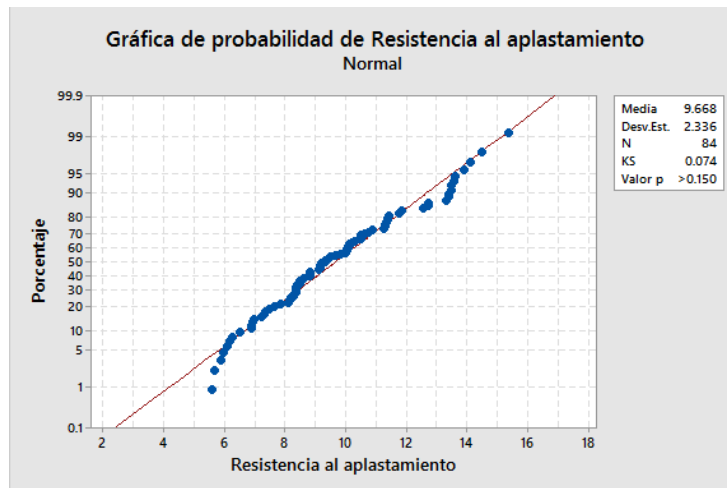


Figura B.2 Prueba de normalidad para la Resistencia al aplastamiento en la madera

Los resultados obtenidos en las pruebas de normalidad, muestran que el valor p es mayor al nivel de significancia (0.05), por lo tanto, los resultados obtenidos para la tensión de fluencia en el acero y la resistencia al aplastamiento, se ajustan a una distribución normal.

Prueba de Igualdad de Varianza (Bartlett)

Se aplicó una prueba de igualdad de varianza, con un nivel de confiabilidad de 95% para la Tensión de fluencia en el acero y a la resistencia al aplastamiento. A continuación, en la figura B.1 y B.2, se muestran los resultados obtenidos.

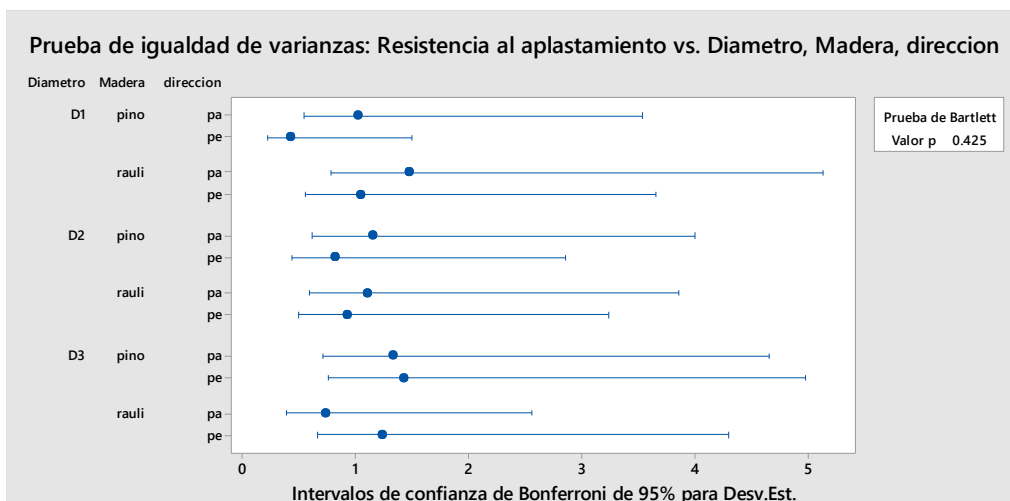


Figura B.3. Prueba de igualdad de varianza para la resistencia al aplastamiento en la madera.

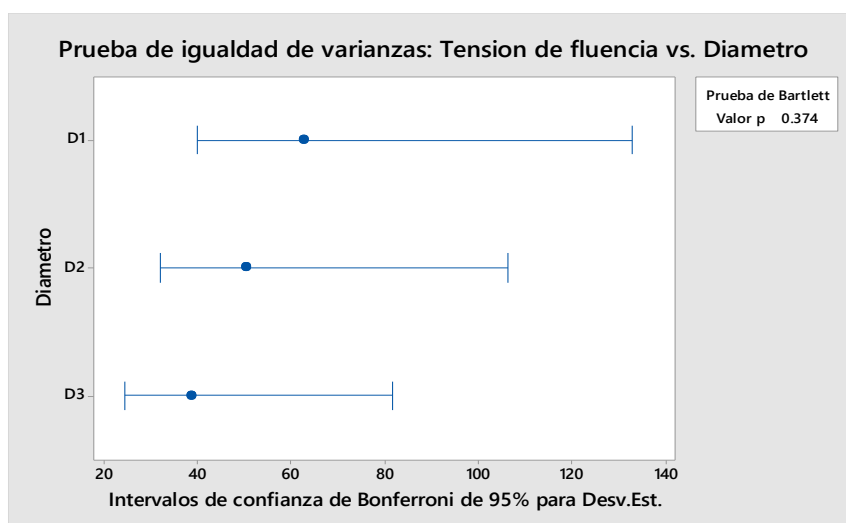


Figura B.4. Prueba de igualdad de varianza para la tensión de fluencia en el acero.

Los resultados obtenidos a través de la prueba de igualdad de varianza, aceptan la hipótesis nula ($p > 0.05$) corroborando de esta manera, la igualdad de varianza entre factores.

Resultados Análisis ANOVA y Tukey

Habiendo corroborado las hipótesis pertinentes para la aplicación del análisis ANOVA, se procede a presentar sus resultados.

Tabla B.1. Resultado Análisis de Varianza para el Factor Diámetro, en la Tensión de Fluencia en el Acero

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F	Fcrit	Probabilidad (valor p)
Diámetro	2	532020.48	266010	98.62	3.35	3.8802E-13
Error	27	72828.77	2697			
Total	29	604849				

Tabla B.2 Comparación entre Medias de Niveles para el Factor Diámetro, en la Tension de Fluencia en el Acero. Metodo de Tukey

Diferencia de niveles	Diferencia entre medias	EE de diferencia	Intervalo de confianza de 95%	Valor T	Valor p ajustado
D2-D1	-210.6	23.2	-268.3 a -153.0	-9.07	0
D3-D1	-321.0	23.2	-378.7 a -263.4	-13.82	0
D3-D2	-110.4	23.2	-168.0 a -52.7	-4.75	0

Tabla B.3. Análisis ANOVA para el Factor Diámetro en la Resistencia al Aplastamiento en Pino Radiata, con Carga Perpendicular y Paralela a la Fibra

Fuente	Carga paralela				Carga perpendicular			
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	p	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	p
Diámetro	2	56.52	28.261	0	2	55.84	27.918	0
Error	18	24.35	1.353		18	17.15	0.953	
Total	20	80.87			20	72.99		

Tabla B.4. Análisis ANOVA para el Factor Diámetro en la Resistencia al Aplastamiento en Raulí, con Carga Perpendicular y Paralela a la Fibra

Fuente	Carga paralela				Carga perpendicular			
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	p	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	p
Diámetro	2	96.87	48.345	0	2	38.69	19.343	0
Error	18	23.59	1.130		18	20.92	1.162	
Total	20	120.46			20	59.60		

Tabla B.5. Comparación entre Medias de Niveles para el Factor Diámetro, en la Resistencia al Aplastamiento en el Pino Radiata, con Carga Perpendicular y Paralela a la fibra. Metodo Tukey

Diferencia de niveles	Carga paralela			Carga perpendicular		
	Diferencia de las medias	EE de diferencia	Intervalo de confianza de 95%	Diferencia de las medias	EE de diferencia	Intervalo de confianza de 95%
D2-D1	0.605	0.622	-0.982 a 2.192	0.914	0.522	-0.418 a 2.246
D3-D1	3.743	0.622	2.156 a 5.330	3.824	0.522	2.492 a 5.156
D3-D2	3.183	0.622	1.551 a 4.725	2.910	0.522	1.578 a 4.242

Tabla B.6 Comparación entre Medias de Niveles para el Factor Diámetro, en la Resistencia al Aplastamiento en el Raulí, con Carga Perpendicular y Paralela a la fibra. Metodo Tukey

Diferencia de niveles	Carga paralela			Carga perpendicular		
	Diferencia de las medias	EE de diferencia	Intervalo de confianza de 95%	Diferencia de las medias	EE de diferencia	Intervalo de confianza de 95%
D2-D1	1.896	0.612	0.334 a 3.458	1.111	0.525	0.265 a 3.206
D3-D1	5.198	0.612	3.636 a 6.760	3.842	0.525	1.853 a 4.794
D3-D2	3.302	0.612	1.740 a 4.464	2.713	0.525	0.117 a 3.059

Tabla B.7. Resultado ANOVA para el Factor Dirección de Carga en la Resistencia al Aplastamiento en el Pino Radiata”

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F	Fcrit	Probabilidad (valor p)
Direccion	1	53.43	53.435	14.24	4.08	0.001
Error	40	150.15	3.754			
Total	41	203.18				

Tabla B.8 Resultado ANOVA para el Factor Dirección de Carga en la Resistencia al Aplastamiento en el Raulí”

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F	Fcrit	Probabilidad (valor p)
Direccion	1	24.69	24.691	5.48	4.084	0.024
Error	40	180.06	4.502			
Total	41	204.75				

Tabla B.9 Resultado ANOVA para el Factor Densidad en la Resistencia al Aplastamiento en Carga Paralela a la Fibra

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F	Fcrit	Probabilidad (valor p)
Densidad	1	12.554	12.554	2.522	4.084	0.120
Error	40	199.05	4.9			
Total	41	211.61				

Tabla B.10 Resultado ANOVA para Factor de Densidad en la Resistencia al Aplastamiento en Carga Perpendicular a la Fibra

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F	Fcrit	Probabilidad (valor p)
Densidad	1	34.623	34.623	10.55	4.084	0.0023
Error	40	131.157	3.278			
Total	41	165.780				

APÉNDICE C: FALLO EN PROBETAS DE ENSAYO

En el siguiente apéndice se presenta una recolección de imágenes de las probetas de ensayo y tornillos autoperforantes, con el fin de registrar el fallo producido en el desarrollo de los experimentos.



Figura C.1 "Aplastamiento en probeta de raulí en carga paralela a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 4.11mm



Figura C.2 "Aplastamiento en probeta de raulí en carga perpendicular a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 4.11mm



Figura C.3 "Aplastamiento en probeta de Pino Radiata en carga paralela a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 4.1mm

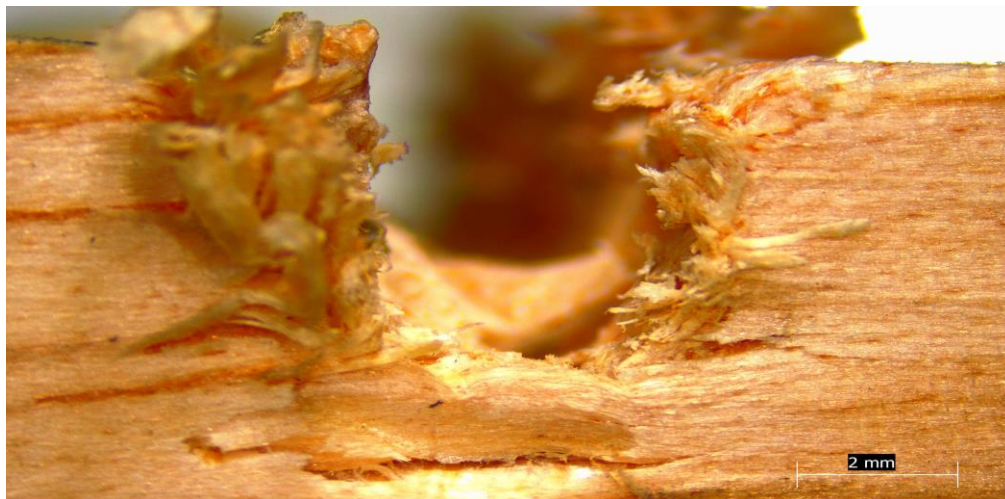


Figura C.4 "Aplastamiento en probeta de Pino Radiata en carga perpendicular a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 4.1mm



Figura C.5 "Aplastamiento en probeta de Raulí en carga paralela a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 3.6 mm



Figura C.6 “Aplastamiento en probeta de Raulí en carga perpendicular a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 3.6 mm”



Figura C.7 “Aplastamiento en probeta de Pino Radiata en carga paralela a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 3.6 mm”



Figura C.8 “Aplastamiento en probeta de Pino Radiata en carga perpendicular a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 3.6 mm”



Figura C.9 "Aplastamiento en probeta de Rauli en carga paralela a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 2.8 mm"



Figura C.10 "Aplastamiento en probeta de Rauli en carga perpendicular a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 2.8 mm"



Figura C.11 "Aplastamiento en probeta de Pino Radiata en carga paralela a la fibra y con tornillo autoperforante de diámetro 2.8 mm"

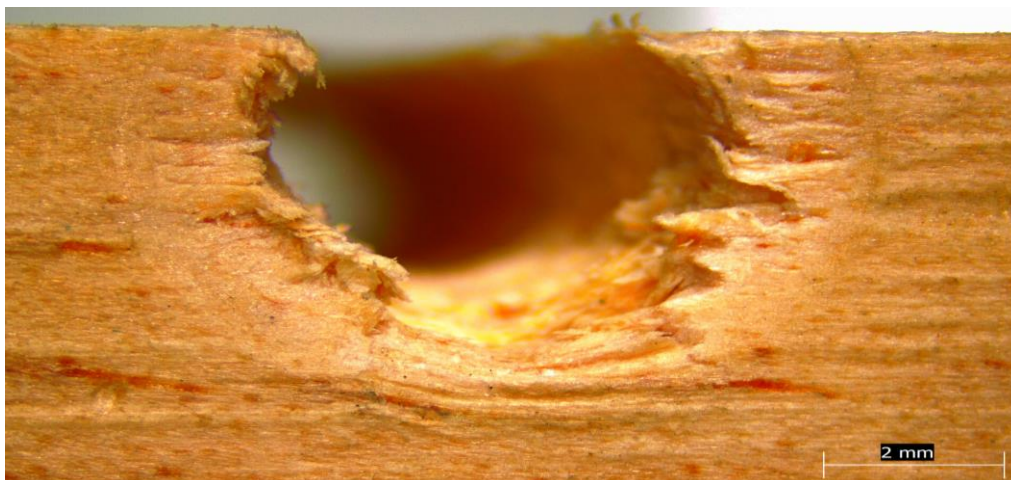


Figura C.12 "Aplastamiento en probeta de Pino Radiata en carga perpendicular a la fibra y con tornillo auto perforante de diámetro 2.8 mm

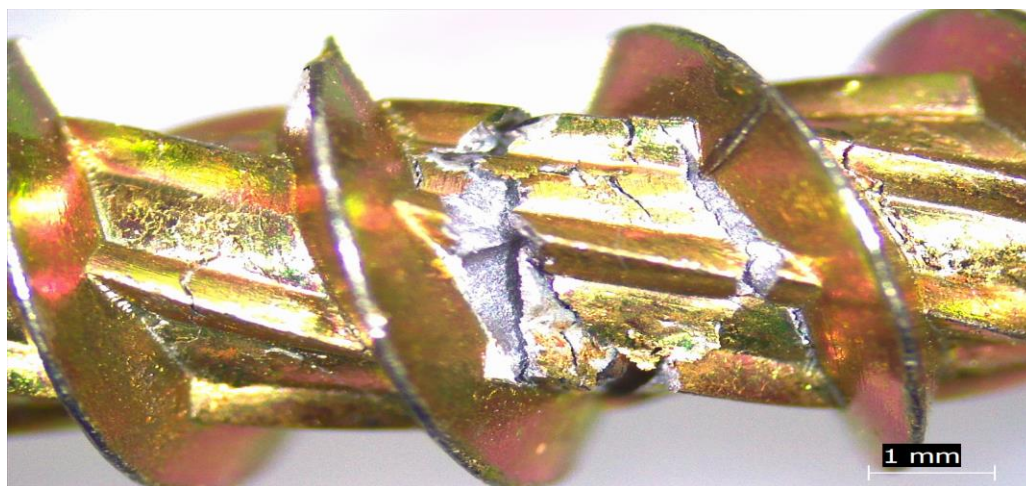


Figura C.13 "Follo por flexión en tornillo auto perforante de diámetro 4.11 mm"

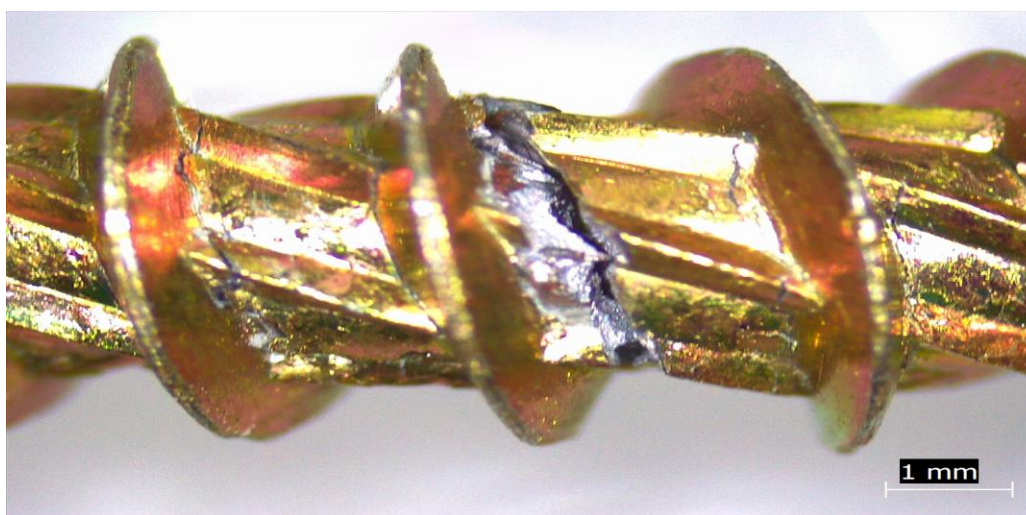


Figura C.14 "Follo por flexión en tornillo auto perforante de diámetro 3.6 mm".

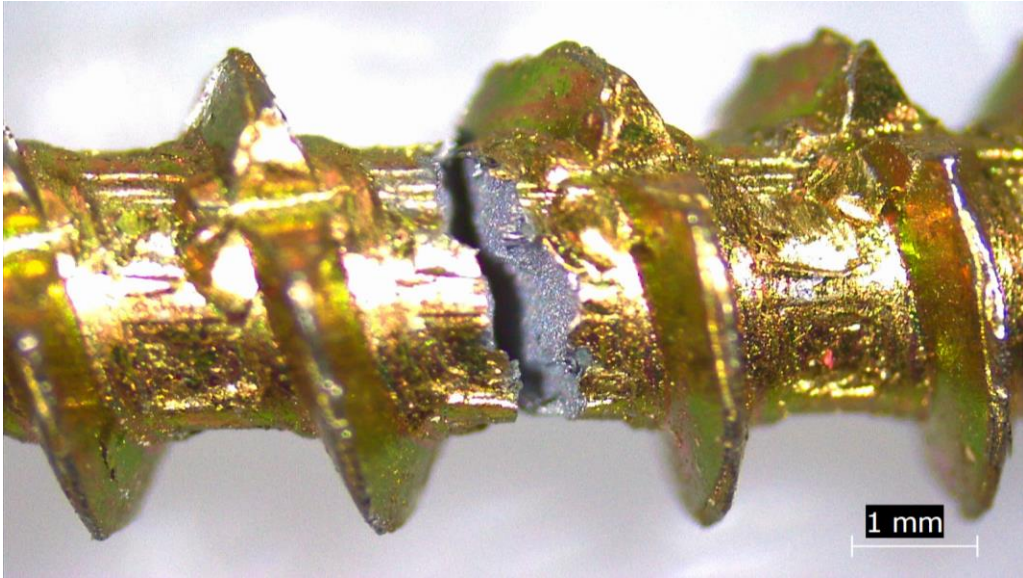


Figura C.15 "Follo por flexión en tornillo atuoperforante de diámetro 3.6 mm".