



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**RESISTENCIA Y RIGIDEZ NORMAL A LA FIBRA EN MADERA PINO RADIATA
SOMETIDA A COMPRESIÓN NORMAL**

POR

Eduardo Enrique Vivallo Martínez

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Rodrigo Silva Muñoz

Profesores Comisión
Siva Avudaiappan

Profesional Externo
Jorge Catalán
Peter Dechent

Julio, 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Eduardo Vivallo Martínez Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

La alta contaminación ambiental causada por la construcción a nivel mundial ha impulsado el interés en el uso de la madera para aplicaciones estructurales. A pesar de que Chile es un país forestal, la construcción en madera es considerablemente inferior a la de países de Norteamérica y Europa. En este contexto, y con el objetivo de convertirse en carbono neutral, se espera que en el futuro se construyan edificios de mediana altura en base a madera. Sin embargo, la madera presenta un comportamiento anisotrópico que afecta su resistencia ante cargas en diferentes direcciones. Específicamente, en estructuras de mediana a gran altura, la resistencia perpendicular a la fibra es importante debido a los asentamientos y deformaciones que puede experimentar en sus apoyos, por lo que este estudio se enfoca en analizar la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra en elementos de madera utilizados en marcos y entramados de construcción. El objetivo principal es obtener información precisa sobre la resistencia y rigidez de la madera en condiciones reales de construcción en Chile, para proporcionar datos confiables en el diseño estructural y mejorar las normativas existentes. Para ello, se realizó una revisión de literatura científica y técnica, así como un análisis de las normativas vigentes. Se consideraron esquemas de ensayo que reflejaran las condiciones reales de construcción, siguiendo las pautas del Instituto Nacional de Normalización (INN) como también, pruebas adicionales basadas en estudios previos. Los resultados de estos, se sometieron a un análisis estadístico descriptivo y se compararon con los valores admisibles establecidos en la normativa de diseño. También se compararon las deformaciones experimentadas con factores de ajuste que consideran las interacciones entre elementos de madera y metal-madera según la *National Design Specification* (NDS). Los resultados indicaron diferencias significativas en la resistencia y rigidez entre los ensayos de interacción madera-madera y el ensayo normado vigente. Se concluyó que el enfoque actual de las normativas chilena y estadounidense no representa de manera precisa todas las condiciones de apoyo comunes en la construcción. En este sentido, se propuso que los resultados de rigidez y deformación obtenidos en los ensayos de interacción madera-madera pueden ser utilizados como una alternativa para estimar lo que ocurriría en aplicaciones estructurales típicas. Además, se destaca la importancia de considerar una deformación de 1 mm en los ensayos según la NCh 974 para determinar el valor admisible de resistencia a compresión perpendicular a la fibra, por lo que este trabajo de investigación aporta contribuciones significativas al campo de la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra en elementos de madera en Chile.

ABSTRACT

The high environmental pollution caused by construction worldwide has driven interest in the use of wood for structural applications. Although Chile is a forested country, wood construction is considerably lower than in North American countries. In this context, and with the goal of becoming carbon neutral, it is expected that in the future medium-rise buildings will be built using wood. However, wood presents an anisotropic behavior that affects its resistance to loads in different directions. Specifically, in medium- to high-rise structures, the resistance perpendicular to the fiber is important due to the settlements and deformations that can occur in its supports. Therefore, this study focuses on analyzing the resistance to compression perpendicular to the grain in wood elements used in building frames and trusses. The main objective is to obtain accurate information on the strength and stiffness of wood in real construction conditions in Chile, in order to provide reliable data for structural design and improve existing regulations. For this purpose, a review of scientific and technical literature was carried out, as well as an analysis of current regulations. Test schemes reflecting real construction conditions were considered, following the guidelines of the National Standards Institute (INN) as well as additional tests based on previous studies. The results of these tests were subjected to a descriptive statistical analysis and compared with the admissible values established in the design standards. The deformations experienced were also compared with adjustment factors that consider the interactions between wood and metal-wood elements according to the National Design Specification (NDS). The results indicated significant differences in strength and stiffness between the wood-wood interaction tests and the current standard test. It was concluded that the current approach of the Chilean and U.S. standards does not accurately represent all common support conditions in construction. In this sense, it was proposed that the stiffness and deformation results obtained in the wood-wood interaction tests can be used as an alternative to estimate what would occur in typical structural applications. In addition, the importance of considering a deformation of 1 mm in the tests according to NCh 974 to determine the admissible value of compressive strength perpendicular to the grain is emphasized. Therefore, this research work provides significant contributions to the field of perpendicular-to-fiber compressive strength in wood elements in Chile.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud al Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR) por la facilitación de datos, material y equipos para este trabajo. Su colaboración fue fundamental para acceder a información relevante y contar con las herramientas necesarias para llevar a cabo el análisis y las experimentaciones requeridas. Quiero extender mi agradecimiento a Don Gonzalo Hernández, Gerente del LME-INFOR por la oportunidad otorgada de ser partícipe de este proyecto, junto con toda su consideración entregada. También, no puedo dejar de mencionar a cada uno de los profesionales del LME-INFOR que brindaron asesoramiento y orientación a lo largo de esta investigación. Su experiencia y conocimientos en el área fueron de gran ayuda para la conceptualización y desarrollo del proyecto. Asimismo, quiero reconocer y agradecer al Ing. Civil Jorge Catalán a cargo del proyecto, por su guía y apoyo durante todo el proceso.

También, expresar mi más sincero agradecimiento al profesor Peter Dechent por su preocupación y guía otorgada para la realización de esta Memoria de Título, por la total entrega a su vocación, y por cada una de las consideraciones y comentarios que tuvo hacia mi persona.

De la misma manera quiero agradecer al profesor Rodrigo Silva y Siva Avudaiappan, por su tiempo, dedicación y valiosos aportes en la revisión y evaluación de este trabajo.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi agradecimiento a mis padres, hermana, amigos y seres queridos por su constante apoyo y comprensión entregado durante todos los años de estudio. Su apoyo incondicional fue un factor clave en mi éxito académico y personal.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Metodología de trabajo	2
1.5 Principales resultados y conclusiones	4
1.6 Organización del documento	4
CAPITULO 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
2.1 Introducción	5
2.2 Madera como elemento estructural	5
2.3 Elementos de madera frente a cargas de compresión.....	6
2.4 NCh 974-1986 - Ensayo de compresión perpendicular a las fibras	8
2.5 NCh 3028/1 – 2017 - Métodos de ensayo en tamaño estructural	8
2.6 <i>National Design Specification</i> - NDS (2015)	9
2.7 Caracterización de la compresión perpendicular a la fibra en la construcción de madera - Basta, C. T., Gupta, R., Leichti, R. J. y Sinha, A. (2011).....	10
2.8 Ensayos de compresión perpendicular a la dirección de la fibra – Mario Wagner (s.f.).....	12
2.9 Conclusiones	14
CAPITULO 3 METODOLOGÍA DE ENSAYOS DE LABORATORIO	15
3.1 Introducción	15
3.2 Ensayos considerados	15
3.3 Equipos y materiales.....	20
3.3.1 ZwickRoell ProLine Z100	20
3.3.2 Pie de metro digital	20
3.3.3 Medidor de humedad L610 para cámara de secado	21

3.3.4	Probetas de madera Pino Radiata.....	21
3.4	Metodología de Ensayos.....	22
3.5	Curvas carga - deformación promedios.....	25
3.6	Extracción de datos de curvas carga vs deformación.....	25
3.7	Tensión de trabajo en elementos en compresión normal a la fibra.....	27
3.8	Rigidez rango elástico lineal.....	28
3.9	Conclusiones.....	28
CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		29
4.1	Introducción.....	29
4.2	Datos de registro de probetas.....	29
4.3	Ensayo según NCh974.....	30
4.3.1	Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal.....	30
4.4	Ensayo según NCh 3028-1.....	32
4.4.1	Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal.....	32
4.5	Ensayo según esquema A de Basta <i>et al</i> (2011) con probetas 2"x4".....	33
4.5.1	Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal.....	34
4.6	Ensayo según esquema A de Basta <i>et al</i> (2011) con probetas 2"x6".....	35
4.6.1	Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal.....	36
4.7	Ensayo según esquema A de Basta <i>et al</i> (2011) con probetas 2"x8".....	37
4.7.1	Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal.....	37
4.8	Ensayo según esquema B de Basta <i>et al</i> (2011).....	38
4.8.1	Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal.....	39
4.9	Ensayo según esquema A cargado en el centro con probetas 2"x6".....	40
4.9.1	Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal.....	41
4.10	Ensayo según esquema A cargado en el centro con probetas 2"x8".....	42
4.10.1	Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal.....	43

4.11	Comparación de resistencia a compresión normal	44
4.12	Comparación de rigidez elástica lineal	48
4.12.1	Resultados obtenidos en ensayos cíclicos	50
4.13	Comparación de deformaciones	52
CAPITULO 5 CONCLUSIONES.....		58
5.1	Conclusiones	58
5.2	Líneas futuras de investigación.....	60
ANEXOS		64
ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....		64
ANEXO 3.1 Historial de carga CUREE básico simplificado controlado por deformación		66
ANEXO 3.2 Curvas carga – deformación		66
ANEXO 3.3 Ejemplo de código de programación utilizado para extracción de datos		74
ANEXO 3.4 Ejemplo de datos de entrada y gráficos realizados para ensayos cíclicos		77
ANEXO 4.1 Análisis de estadística descriptiva.....		79
A4.1.1	Medidas de dispersión	79
A4.1.2	Análisis de varianza (ANOVA) unidireccional	81
ANEXO 4.2 Límites de Tolerancia (LT)		82
A4.2.1	Enfoque paramétrico	82
A4.2.2	Enfoque no paramétrico	83
ANEXO 4.3 Factores de ajuste para estadísticas experimentales.		84
ANEXO 4.4 Norma Chilena NCh1198:2014 Madera – Construcciones en madera – Cálculo.....		84
A4.4.1	Tensiones y módulos elásticos para madera Pino Radiata	84
A4.4.2	Estimación de aplastamiento en piezas de Pino Radiata	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1: Factores de ajuste para deformación según interacción.	10
Tabla 2. 2: Dimensiones de probetas y datos considerados por esquema de ensayo.	11
Tabla 2. 3: Resultados globales, compresión perpendicular, estado seco H=12%.	13
Tabla 2. 4: Comparación de criterios considerados para cálculo de tensión admisible.	14
Tabla 3. 1: Dimensiones y cantidad de probetas. 22	
Tabla 3. 2: Velocidad de carga y deformación final de cada tipo de ensayo.....	23
Tabla 3. 3: Número de ciclos y deformación alcanzada en cada uno para ensayos carga-descarga. .	24
Tabla 4. 1: Tabla resumen de propiedades físicas de probetas por ensayo. 29	
Tabla 4. 2: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos NCh 974.....	30
Tabla 4. 3: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo NCh 974.	31
Tabla 4. 4: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn según ensayo NCh 974.	31
Tabla 4. 5: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos NCh 3028-1. .	32
Tabla 4. 6: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo NCh 3028-1.	33
Tabla 4. 7: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo según NCh 3028- 1.	33
Tabla 4. 8: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos Esquema A con probetas 2"x4".	34
Tabla 4. 9: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x4".	35
Tabla 4. 10: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x4".	35
Tabla 4. 11: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos Esquema A con probetas 2"x6".	36
Tabla 4. 12: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x6".	36
Tabla 4. 13: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x6".	37
Tabla 4. 14: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos Esquema A con probetas 2"x8".	37
Tabla 4. 15: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x8".	38

Tabla 4. 16: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x8" .	38
Tabla 4. 17: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos Esquema B. .	39
Tabla 4. 18: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo Esquema B.	40
Tabla 4. 19: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo Esquema B. ..	40
Tabla 4. 20: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos esquema A cargado en el centro probetas 2"x6" .	40
Tabla 4. 21: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo esquema A cargado en el centro probetas 2"x6" .	41
Tabla 4. 22: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo esquema A cargado en el centro probetas 2"x6" .	42
Tabla 4. 23: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos esquema A cargado en el centro probetas 2"x8" .	42
Tabla 4. 24: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo esquema A cargado en el centro con probetas 2"x8" .	43
Tabla 4. 25: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo esquema A cargado en el centro con probetas 2"x8" .	43
Tabla 4. 26: Relación de Rcn promedio a 1mm de deformación entre ensayos.	45
Tabla 4. 27: Relación de Rcn con límite de tolerancia del 5% a 1mm de deformación entre ensayos.	46
Tabla 4. 28: Relación de Rcn promedio a 1mm y 2.5mm de deformación "offset" entre ensayos. ..	46
Tabla 4. 29: Relación de Rcn, límite de tolerancia 5% a 1mm y 2.5mm de deformación "offset" entre ensayos.	47
Tabla 4. 30: Relación en porcentaje entre rigideces observadas en los ensayos.	48
Tabla 4. 31: Relación en porcentaje entre rigideces observadas en los ensayos Esquema A y Esquema A cargado en el centro.	49
Tabla 4. 32: Relación en porcentaje entre rigideces y deformación remanente observadas en ensayos cíclicos.	51
Tabla 4. 33: Relación entre rigideces observadas en los ciclos de carga en ensayos cíclicos.	52
Tabla 4. 34: Comparación de deformaciones observadas en los ensayos con respecto a carga admisible.	53

Tabla 4. 35: Comparación de deformaciones de ensayos y factores de ajuste de la NDS.	54
Tabla 4. 36: Datos asociados al análisis descriptivo del índice de aplastamiento de cada ensayo. ...	55
Tabla 4. 37: Comparación de aplastamiento estimado entre ensayos.	56
Tabla 4. 38: Comparación de aplastamiento estimado inherente al percentil 95% entre ensayos.	57
Tabla 4. 39: Deformación anelástica promedio experimentada por ensayos de laboratorio.	57
Tabla A. 1: Tensiones admisibles y módulo de elasticidad en flexión para Pino Radiata seca: H=12%, MPa.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1: Ejes de una pieza de madera.	6
Figura 2. 2: Comportamiento de madera a compresión normal a su fibra.	7
Figura 2. 3: Esquema de ensayo a compresión normal.	8
Figura 2. 4: Esquema de ensayo a compresión normal.	9
Figura 2. 5: Esquema A de ensayo a compresión normal.	10
Figura 2. 6: Esquema B de ensayo a compresión normal.	11
Figura 2. 7: Diagrama comparativo curva carga vs deformación.	12
Figura 2. 8: Esquema de ensayo de compresión perpendicular a la dirección de la fibra.	13
Figura 3. 1: Esquema utilizado para ensayos cíclicos y método según NCh 974. 16	
Figura 3. 2: Implementación de ensayos cíclicos y método según NCh 974.	16
Figura 3. 3: Representación de muro de corte y cargas dinámicas.	16
Figura 3. 4: Esquema de ensayo según NCh 3028-1.	16
Figura 3. 5: Implementación de ensayo según NCh 3028-1.	17
Figura 3. 6: Esquema de ensayo según Esquema A de Basta <i>et al</i> (2011).	17
Figura 3. 7: Implementación de ensayo según Esquema A de Basta <i>et al</i> (2011).	18
Figura 3. 8: Esquema de ensayo según Esquema B de Basta <i>et al</i> (2011).	18
Figura 3. 9: Implementación de ensayo según Esquema B de Basta <i>et al</i> (2011).	18
Figura 3. 10: Representación de envigado de entrepiso (Esquema A) y base de muro de tabiquería (Esquema B).	19
Figura 3. 11: Esquema de ensayo Esquema A cargado en el centro.	19
Figura 3. 12: Implementación de ensayo según Esquema A cargado en el centro.	19
Figura 3. 13: Máquina de ensayos universal ZwickRoell ProLine Z100.	20
Figura 3. 14: Pie de metro digital.	21
Figura 3. 15: Medidor de humedad L610.	21
Figura 3. 16: Plan de ensayo utilizado para ensayos cíclicos.	24
Figura 3. 18: Gráfico de los datos obtenidos en ensayo de laboratorio.	27
Figura 4. 1: Representación de área cargada para ensayos según NCh 974. 30	
Figura 4. 7: Gráfico comparación de curvas promedio carga-deformación entre ensayos.	44
Figura 4. 8: Gráfico comparación de curvas tensión-deformación promedio entre ensayos.	45

Figura 4. 9: Gráfico comparación de curvas tensión-deformación promedio sin acomodo inicial entre ensayos.....	46
Figura 4. 10: Gráfico comparación de curvas carga-deformación promedio con regresión en rango elástico.	48
Figura 4. 11: Gráfico carga-deformación de ensayo de carga cíclico.	50
Figura 4. 12: Gráfico comparativo de deformación entre curvas promedios de los ensayos.	53
Figura 4. 13: Función de densidad de Probabilidad Normal.	53
Figura 4. 14: Deformación anelástica (δ_0) y elástica (δ_e) y total (δ_{tot}) en curva tensión-deformación.	55
Figura A. 1: Historial de carga CUREE básico simplificado controlado por deformación.	66
Figura A. 2: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según NCh 974.	66
Figura A.3: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según NCh 974.....	67
Figura A.4: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según NCh 3028-1.....	67
Figura A.5: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según NCh 3028-1.	68
Figura A. 6: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema A 2"x4" Basta et al (2011).	68
Figura A. 7: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema A 2"x4" Basta et al (2011).....	69
Figura A. 8: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema A 2"x6" Basta et al (2011).	69
Figura A. 9: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema A 2"x6" Basta et al (2011).....	70
Figura A. 10: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema A 2"x8" Basta et al (2011).	70
Figura A. 11: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema A 2"x8" Basta et al (2011).....	71
Figura A. 12: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema B Basta et al (2011).....	71
Figura A. 13: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema B Basta et al (2011).....	72

Figura A. 14: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema A cargado en el centro 2"x6".	72
Figura A. 15: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema A cargado en el centro 2"x6".	73
Figura A. 16: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema A cargado en el centro 2"x8".	73
Figura A. 17: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema A cargado en el centro 2"x8".	74
Figura A. 18: Documento de texto con datos obtenidos en laboratorio.	77
Figura A. 19: Gráfico curva carga-deformación de los datos obtenidos en ensayo de laboratorio. ..	78
Figura A. 20: Gráfico curva deformación-duración de los datos obtenidos en ensayo de laboratorio.	78
Figura A. 21: Gráfico curva carga-duración de los datos obtenidos en ensayo de laboratorio.	79

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En los últimos años el uso de la madera en la construcción ha experimentado un interés creciente y de alcance mundial (García y Benedetti, 2021), debido a sus ventajas medioambientales y constructivas, ya que se trata de un recurso renovable, aislante térmico, de producción limpia y eficiente, de buen comportamiento sísmico y bajo tiempo de construcción. También, como en el sector de la construcción se produce un alto nivel de contaminación ambiental a nivel mundial, el cual bordea el 30% del total de emisiones de gases efecto invernadero en el mundo (Acuña *et al*, 2019), se ha visto potenciado el desarrollo de productos de madera más sostenibles y optimizados para aplicaciones estructurales, como alternativa a los materiales de construcción convencionales, como el acero y el hormigón. En Chile, a pesar de ser un país forestal, la construcción en madera, cifras al 2017, sólo se encuentra alrededor de un 20% del mercado, lo cual está muy alejado de países como EEUU o Canadá, donde su participación alcanza un 90% (Aguilera *et al*, 2020). Por ello, y junto a los desafíos de convertirse al 2050 en un país carbono neutral, se espera que, dentro de los próximos años, sea una gran oportunidad para la industria y la relevancia de la madera como material de construcción en el país, pudiéndose materializar obras menores con exigencia estructural, con recursos renovables como la madera.

En esta perspectiva, es preciso unir esfuerzos tanto del sector público como privado, ya sea eliminando los mitos existentes sobre este material y difundiendo sus beneficios, potenciándose con el desarrollo de proyectos más sustentables, con la madera como base principal (García y Benedetti, 2021), junto con una actualización constante de normativas y datos que sean confiables tanto para los profesionales a cargo de diseñar distintos proyectos, como para los usuarios finales, particularmente en Chile, donde la normativa actual, se encuentra vigente desde hace más de 20 años. Si bien, la madera tiene una alta resistencia con respecto a su peso, se trata de un material anisotrópico, con distinto comportamiento ante cargas en distintas direcciones en relación a su fibra. Se destaca la diferencia de resistencia entre cargas paralelas a la dirección de su fibra con las cargas perpendicular, donde estas últimas son mucho menores, específicamente, en edificios de mediana a gran altura, la resistencia perpendicular a la fibra en elementos de construcción, toma gran

importancia debido a las deformaciones y asentamientos que pueden presentar en sus apoyos (Hassan Ali *et al*, 2014). Actualmente, los valores de resistencia en la normativa chilena y estadounidense, están basados en las tensiones medias obtenidas mediante un ensayo de una placa de metal sobre madera, el cual tiene una aplicabilidad limitada en la estructura de construcción (Basta *et al*, 2011). Así, lo que se persigue con este trabajo, es estimar la resistencia y rigidez a compresión normal en elementos de madera Pino Radiata utilizados en la construcción de marcos livianos de madera y sus entramados, tratando de ofrecer datos más cercanos a lo que se presentan realmente en la construcción en Chile con este material.

1.2 Objetivo general

Estimar la resistencia y rigidez a compresión normal en elementos de madera Pino Radiata utilizados en la construcción de marcos livianos de madera y sus entramados.

1.3 Objetivos específicos

1. Identificar esquemas de ensayos que representen de manera óptima la interacción de los elementos de madera en la construcción de marcos livianos y sus entramados.
2. Comparar analíticamente los resultados de resistencia como de deformación obtenidos con los ensayos realizados, con lo establecido en la norma chilena como en la norteamericana.
3. Proponer una relación entre los resultados obtenidos en laboratorio según la interacción madera-madera y metal-madera, representadas mediante los ensayos considerados.

1.4 Metodología de trabajo

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de literatura científica y técnica tales como estudios previos, normativas y metodologías existentes para la determinación de la resistencia a compresión perpendicular a la fibra y así, analizar y comprender los tipos de interacciones de los elementos de

madera presentes en la construcción. Se identificaron diferentes situaciones donde los elementos de madera son cargados en dirección perpendicular a su fibra, donde la carga se transmite directamente de madera a madera, lo cual difiere de lo representado en los ensayos presentes en la normativa chilena, por ello, y con el propósito de realizar una comparación posterior, se diseñaron esquemas de ensayos que replican las condiciones reales presentes en la construcción. Estos esquemas siguieron las pautas establecidas por el Instituto Nacional de Normalización (INN) en las normas NCh 974 y NCh 3028-1, y se tomaron en cuenta pruebas adicionales basadas en estudios previos, como el realizado por Basta *et al*, (2011). A continuación, se definieron las variables clave que requirieron los ensayos, tales como el material utilizado, los modos de carga y los parámetros de evaluación. Posteriormente, se llevaron a cabo los ensayos siguiendo los esquemas diseñados, considerando las variables definidas y registrando los datos obtenidos. Primeramente, se procedió a registrar y recopilar los datos obtenidos durante los ensayos mediante el uso de un código programado en el software Matlab. Este código se encargó de procesar los documentos de texto generados en el laboratorio. Luego, se extrajeron datos específicos de carga a ciertas deformaciones determinadas mediante la revisión de literatura científica, como también, de rigidez elástica y deformación de acomodo mediante recta de regresión realizada en rango elástico de las curvas. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de estadística descriptiva para cada grupo de resultados, clasificados según el esquema de ensayo utilizado. En cuanto a los resultados de resistencia a compresión normal, se evaluaron las diferencias y similitudes encontradas en comparación con los valores admisibles establecidos en la normativa de diseño NCh 1198-2014. Se estableció una carga admisible que pudo determinar las deformaciones experimentadas en cada tipo de ensayo. Estas deformaciones se compararon con los factores de ajuste presentados en la *National Design Specification* (NDS) C4.2.6, los cuales expresan la relación entre los diferentes tipos de interacciones de los elementos en la construcción. Basándose en estos análisis comparativos, se llegó a conclusiones sobre la consistencia de los resultados obtenidos en relación con lo establecido en las normativas vigentes. Se evaluó la relación entre los resultados de las interacciones madera-madera y metal-madera utilizando técnicas estadísticas y análisis comparativos. Específicamente, se estableció una relación entre los resultados obtenidos con respecto a el ensayo normado NCh 974. Se realizaron estas comparaciones para la resistencia a la compresión normal en diferentes niveles de deformación, así como para evaluar la rigidez elástica y las deformaciones experimentadas.

1.5 Principales resultados y conclusiones

Se realizaron comparaciones de la resistencia a compresión perpendicular a la fibra a distintas deformaciones, diferenciando entre las diferentes condiciones de apoyo representadas con los ensayos realizados. Los resultados revelaron diferencias significativas en la resistencia entre los ensayos de interacción madera-madera y el ensayo realizado según la NCh 974, independiente de la deformación considerada. También se demostró una menor rigidez elástica en los ensayos de interacción madera-madera en comparación con los ensayos normados. De estos resultados se pudo concluir que el ensayo vigente en la normativa chilena y norteamericana no es representativo ni preciso para todas las condiciones de apoyo comunes en la construcción. Los valores de rigidez obtenidos en los ensayos de interacción madera-madera pueden ser útiles para estimar la rigidez esperada en aplicaciones estructurales típicas. Los ensayos de carga cíclica realizados utilizando el ensayo establecido en la normativa chilena NCh 974, mostraron que el considerar una deformación de 1 mm para determinar el valor admisible de resistencia a compresión perpendicular a la fibra, es óptimo. Las comparaciones de las deformaciones experimentadas por los ensayos en relación con los estándares establecidos en la normativa norteamericana permitieron evaluar el desempeño de los ensayos para diferentes condiciones de apoyo. Estos resultados pueden ser útiles para relacionar las deformaciones esperadas según las condiciones de apoyo en el diseño de estructuras.

1.6 Organización del documento

El presente documento se estructura en cinco capítulos. En segundo capítulo se describe el marco teórico en el que se basa este trabajo, principalmente, el comportamiento de la madera frente a cargas de compresión perpendicular a la fibra, junto con la literatura científica y técnica más reciente para la determinación de la resistencia a compresión normal a la fibra. En el tercer capítulo se detallan los ensayos de laboratorio realizados, junto con la respectiva metodología empleada para su desarrollo y extracción de datos. En el cuarto capítulo se presentan los principales resultados obtenidos con respecto a resistencia, rigidez y deformación diferenciando las distintas condiciones de apoyo representadas con los ensayos realizados. Finalmente, en el quinto capítulo, se presentan las principales conclusiones obtenidas y se plantean futuras líneas de investigación.

CAPITULO 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Introducción

Este capítulo presenta a la madera como material estructural, y su comportamiento frente a cargas de compresión que actúan en las diferentes direcciones de su fibra, enfatizando en cargas que actúan perpendicularmente a la dirección de su fibra. Se profundiza en los esquemas de ensayos y las consideraciones que se encuentran actualmente vigentes en la norma chilena y norteamericana, junto con lo encontrado en el análisis bibliográfico.

2.2 Madera como elemento estructural

La madera es un material con propiedades básicas bien definidas y puede ser considerada como un material biológico, compuesto principalmente por moléculas de celulosa y lignina. Asimismo, debido a su naturaleza biológica, la madera puede ser biodegradada por insectos y descomponedores primarios. Es un material higroscópico, debido a su facultad de absorber y ceder humedad al ambiente, lo cual está condicionado por las características del entorno en el que se encuentra (CORMA, s.f.). Asimismo, es un material anisotrópico lo que significa que presenta diversos mecanismos de falla en función de las diferentes direcciones de la carga aplicada en relación con la orientación de sus fibras. Este aspecto resulta crucial durante el proceso de diseño y se debe principalmente a la forma alargada de las células de la madera y la disposición estructural de sus paredes celulares (Formolo y Granström, 2007). Por consiguiente, se identifican tres ejes en sus componentes:

- Eje tangencial, el cual es tangente a los anillos de crecimiento y perpendicular al eje longitudinal.
- Eje radial, perpendicular a los anillos de crecimiento y al eje longitudinal.
- Eje axial o longitudinal, paralelo a la dirección de las fibras.

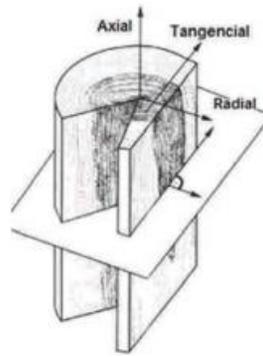


Figura 2. 1: Ejes de una pieza de madera.

Fuente: (CORMA, s.f.).

La madera exhibe propiedades físicas que son de suma importancia en su comportamiento estructural. Uno de estos aspectos es su contenido de humedad, el cual debe ser inferior a un 20% para ser utilizado específicamente como material de construcción (INN, 2014). Además, su densidad es una de las características físicas más relevantes, ya que está relacionada con sus propiedades mecánicas, durabilidad y capacidad de contracción y expansión (CORMA, s.f.).

En el caso de la madera estructural, se encuentran nudos y otras características que están determinadas por el crecimiento natural de los árboles, como grietas, pudrición, rajaduras o presencia de médula. Estas características se consideran defectos desde el punto de vista estructural, ya que pueden afectar sus propiedades mecánicas (Formolo y Granström, 2007). También se le denomina así, a cualquier anomalía química o físico-química que presente un elemento producto de su elaboración, por ejemplo, alabeos, marca de sierra, depresión por cepillado o manchas de procesamiento. (CORMA, s.f.).

2.3 Elementos de madera frente a cargas de compresión

La madera presenta distintas propiedades mecánicas, que determinan su capacidad de resistir fuerzas externas. Este estudio se centra específicamente, en su capacidad de resistencia a la compresión. Dado que la madera es un material anisotrópico, su comportamiento varía según el eje en el que se aplique la carga. La compresión normal a las fibras, donde la madera puede comprimirse en los ejes

radiales y tangencial previamente mencionados, resulta menos favorable en términos de resistencia, comparada con la compresión paralela a las fibras (Hassan Ali *et al*, 2014).

La compresión perpendicular a la dirección de la fibra ocurre en áreas de apoyo entre dos o más elementos de madera, y su capacidad está determinada tanto por el aplastamiento en la zona completamente cargada como por la longitud del elemento sin carga (Formolo y Granström, 2007). El modo de falla en la compresión perpendicular a la fibra se puede ilustrar considerando la zona de apoyo de una viga de madera cargada por una placa de acero (Figura 2.2). En este caso, la compresión en la superficie de la carga provoca una acumulación de fibras cercanas a la placa. A medida que se produce una deformación progresiva, los planos celulares colapsan sucesivamente, lo que resulta en un aumento de la densidad del material en las proximidades de la carga.

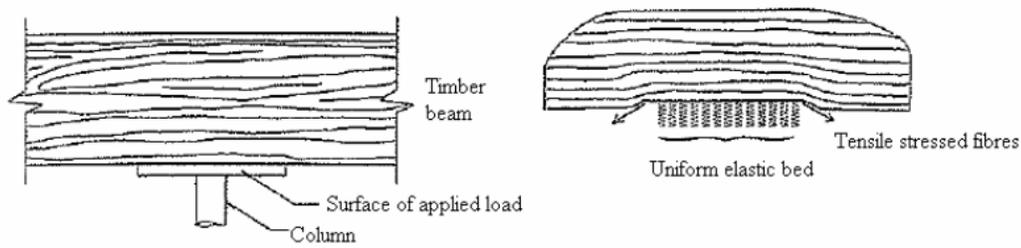


Figura 2. 2: Comportamiento de madera a compresión normal a su fibra.

Fuente: Formolo y Granström (2007).

En general, durante el proceso de compresión perpendicular a la dirección de las fibras, los planos celulares tienden a colapsar en el mismo plano horizontal que la primera ruptura. Aunque todas las celdas en ese plano horizontal colapsen, el material todavía conserva su capacidad para soportar carga. A medida que la carga aplicada aumenta, cada uno de los planos celulares colapsa sucesivamente. Es importante tener en cuenta que la compresión perpendicular a la fibra no conduce a una falla frágil, sin embargo, altos niveles de deformación no podrían garantizar cumplir con los requisitos de funcionalidad de la estructura, lo que podría exceder su límite de servicio (Formolo y Granström, 2007).

2.4 NCh 974-1986 - Ensayo de compresión perpendicular a las fibras

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo de compresión perpendicular a las fibras de la madera, siguiendo la normativa chilena NCh 974-1986, el cual concuerda con la norma americana *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D143-84, consiste en aplicar una carga continua en una cara radial de la muestra, en dirección perpendicular a dicha cara. Durante el ensayo, se registran las deformaciones generadas por la aplicación de la carga hasta alcanzar el punto de falla de la muestra o una deformación máxima de 2,5 mm.

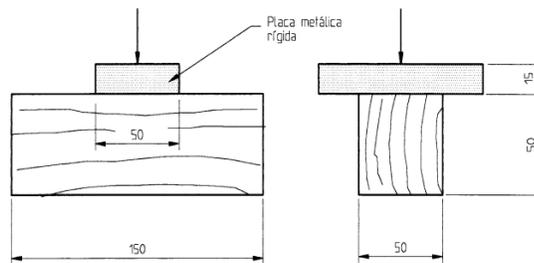


Figura 2. 3: Esquema de ensayo a compresión normal.

Fuente: INN (1986).

Las probetas utilizadas deben tener forma de paralelepípedo recto, con dimensiones precisas de 50 x 50 x 150 mm, medidas con una precisión de +/- 0,3%. Es importante asegurarse de que las probetas sean libres de fallas o defectos que puedan perjudicar los resultados del ensayo. Durante el ensayo, la carga se aplica de manera continua sobre una placa metálica, y la velocidad de aplicación debe ser constante a 0,3 mm/min.

2.5 NCh 3028/1 – 2017 - Métodos de ensayo en tamaño estructural

El método de ensayo se basa en la aplicación de carga a través de un par de placas de apoyo de acero con una longitud de 90 mm y un ancho igual a $d + 10$ mm, donde "d" representa la dimensión transversal de la probeta. Durante el ensayo, la probeta se carga hasta el punto de falla o hasta alcanzar una deformación de 20 mm, lo que precede primero. Es importante tener en cuenta que la velocidad de carga debe ser controlada de manera que la falla ocurra en aproximadamente un minuto.

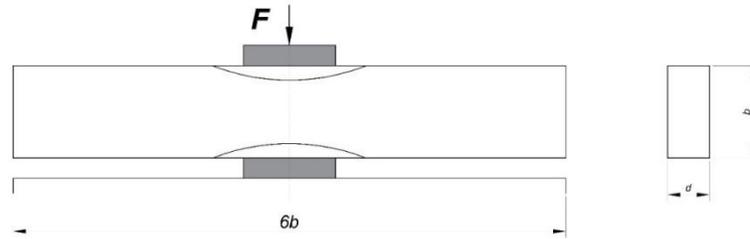


Figura 2. 4: Esquema de ensayo a compresión normal.

Fuente: INN (2017).

En ambos ensayos contemplados en la normativa chilena, es necesario representar los resultados mediante gráficos de carga versus deformación. Estos gráficos permiten determinar el límite de proporcionalidad de la madera y las tensiones admisibles correspondientes a las deformaciones especificadas en el ensayo.

2.6 National Design Specification - NDS (2015)

Establece que, cuando se somete a compresión perpendicular a la fibra, la tensión de trabajo " f_c " debe ser inferior a 0,73 de la tensión admisible " F_c ". En este contexto, se considera que la deformación por aplastamiento será aproximadamente de 0,02 pulgadas cuando " f_c " sea igual a 0,73 " F_c ". Por otro lado, cuando " f_c " es igual a " F_c ", la deformación por aplastamiento será de aproximadamente 0,04 pulgadas. Estos valores se basan en el ensayo estándar definido en la norma ASTM D143. Estos valores son valores de estado límite y no son ajustables para duración de la carga. Con F_c tensión admisible a compresión perpendicular a la fibra, cuando se alcanza una deformación de 0.04 pulgadas, cuyos valores de referencia para el diseño, se encuentran en las tablas 4A, 4B, 4C, 4D, 4E y 4F de la *NDS Supplement, 2015 Edition*. (American Wood Council, 2018).

Según lo establecido en la sección C4.2.6 de la NDS, la deformación en una junta formada por dos elementos de madera cargados perpendicularmente a la fibra será aproximadamente 2,5 veces mayor que la experimentada en una unión de metal con madera. Siguiendo este caso, se proporcionan factores de ajuste para relacionar la deformación según diferentes condiciones de apoyo. Estos factores de ajuste se encuentran documentados en un estudio realizado por Thompson *et al* (2017).

Tabla 2. 1: Factores de ajuste para deformación según interacción.

Condición de apoyo	Factor de ajuste para deformación
1. Madera – Madera (ambas perpendicular a la fibra)	2.5
2. Madera – Madera (una paralela a la fibra y una perpendicular a la fibra)	1.75
3. Metal – Madera (madera cargada perpendicular a su fibra)	1.0

Fuente: Thompson *et al* (2017).

2.7 Caracterización de la compresión perpendicular a la fibra en la construcción de madera - Basta, C. T., Gupta, R., Leichti, R. J. y Sinha, A. (2011).

El estudio realizado por Basta *et al.* en 2011 evaluó el comportamiento de conjuntos típicos utilizados en construcción bajo compresión perpendicular a la fibra. Estos conjuntos involucran miembros que experimentan tensiones de compresión cerca de su extremo longitudinal a través del contacto madera-madera. Este estudio afirma que la compresión metal-madera generada en el ensayo ASTM D143-84 no refleja de manera precisa la compresión típica madera-madera que ocurre en aplicaciones estructurales. Por lo tanto, tal ensayo no pretende determinar una resistencia perpendicular a la fibra físicamente precisa. En respuesta a esta discrepancia, se desarrollaron dos esquemas de ensayo alternativos. El primero, denominado "Esquema A", simula una viga o cercha que se apoya en la solera superior de un muro. El segundo esquema, denominado como "Esquema B", representa la compresión ejercida por un pie derecho sobre la solera inferior de un muro. Estos esquemas de ensayo fueron diseñados para proporcionar una representación más realista de la compresión de madera-madera en aplicaciones estructurales. A continuación, se presenta una descripción detallada de los esquemas de ensayo utilizados en el estudio.

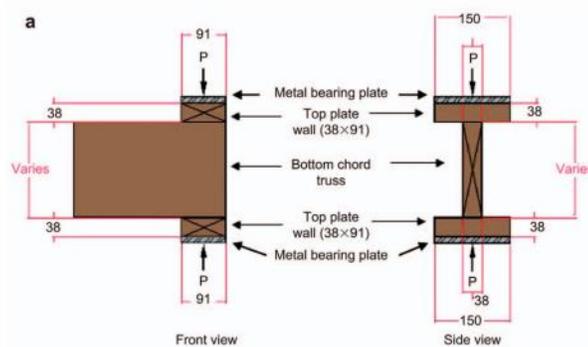


Figura 2. 5: Esquema A de ensayo a compresión normal.

Fuente: Basta *et al* (2011).

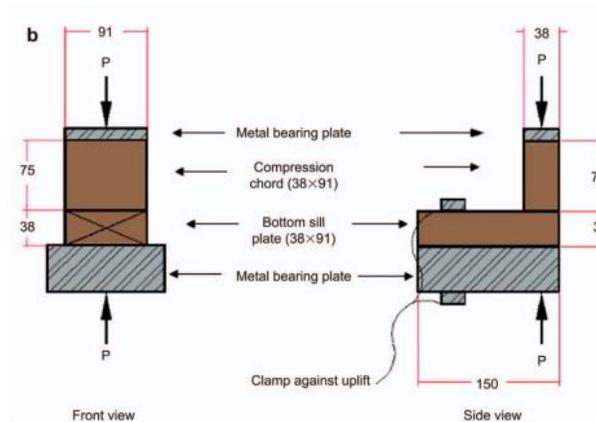


Figura 2. 6: Esquema B de ensayo a compresión normal.
Fuente: Basta *et al* (2011).

En el estudio realizado, se llevó a cabo ensayos utilizando el "Esquema A" con probetas de diferentes dimensiones, que incluyeron tamaños de 2"x4", 2"x8" y 2"x12". En la siguiente tabla se detallan las dimensiones de las probetas utilizadas, el número de probetas ensayadas y la velocidad de ensayo aplicada:

Tabla 2. 2: Dimensiones de probetas y datos considerados por esquema de ensayo.

Douglas fir elements in assemblies			Number of samples (<i>n</i>)		Loading rate (mm min ⁻¹) ^a	
Dimension (mm)	Dimension (mm)	Symbol ^b	Assembly	ASTM ^c	Initial	Post
B.C. truss 38×89	T.P. wall 38×89	BC-2×4	20	20	3.3	33
B.C. truss 38×184	T.P. wall 38×89	BC-2×8	17	20	5.0	26
B.C. truss 38×292	T.P. wall 38×89	BC-2×12	20	20	7.5	7.2
B.P. 38×39	C.C. wall 38×89	BP-2×2	20	20	0.76	7.6

Fuente: Basta *et al* (2011).

En el Esquema A, como se muestra en la Figura 2.5, los elementos que conforman el ensayo son B.C. (*bottom chord*) y T.P. (*top plate*). Mientras que, en el Esquema B, presentado en la Figura 2.6, los elementos que conforman el ensayo son B.P. (*bottom sill plate*) y C.C. (*compression chord*).

Todas las probetas fueron ensayadas hasta un criterio de falla establecido, registrando la carga a una deformación de 1mm ($P_{0.04}$). A partir de esta deformación, se calculó el esfuerzo dividiendo la carga aplicada por el área de aplicación. Los resultados de los ensayos de interacción madera-madera revelaron que las tensiones observadas a una deformación de 1 mm fueron siempre inferiores a las tensiones obtenidas utilizando el método de ensayo de ASTM D143-84. Además, se observaron

grandes aplastamientos en los ensamblajes de madera sobre madera durante las pruebas (Figura 2.7). En el caso de las probetas del "Esquema B", se demostró una tendencia a que se produjera una fractura longitudinal a lo largo de su eje principal debido a las fuerzas de tracción transversal que se generaban en el elemento a medida que se densificaba, debido a la compresión en un extremo del elemento. Por otro lado, las probetas del "Esquema A", cuando se cargaban tangencialmente, se doblaban en la dirección de la curvatura anual del anillo. La combinación de la curvatura del anillo y la relación de aspecto tendían a producir el fallo por cizallamiento por rodadura en los elementos del "Esquema A" a lo largo de la interfaz entre la madera temprana y la madera tardía (Basta et al, 2011).

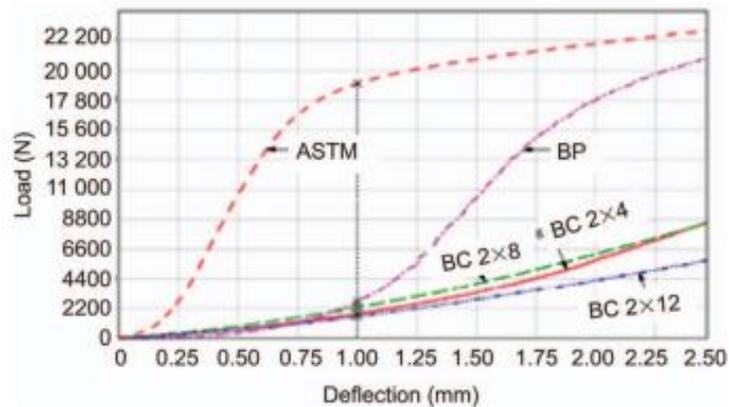


Figura 2. 7: Diagrama comparativo curva carga vs deformación.
Fuente: Basta *et al* (2011).

2.8 Ensayos de compresión perpendicular a la dirección de la fibra – Mario Wagner (s.f.)

En este estudio, se realizaron ensayos siguiendo un plan similar al establecido por la norma NCh 974. Se empleó la misma dimensión de la placa metálica y se aplicó la carga a la misma velocidad recomendada por la norma. Sin embargo, se emplearon probetas de diferentes escuadrías para evaluar tres calidades distintas de la madera (GS, G1 y G2).

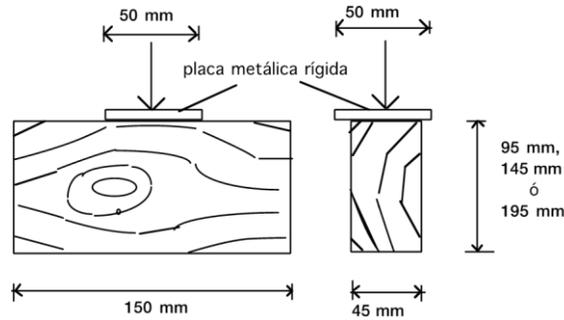


Figura 2. 8: Esquema de ensayo de compresión perpendicular a la dirección de la fibra.
Fuente: Wagner, M. (s.f).

En la etapa inicial de los ensayos, se determinó la tensión admisible de resistencia a compresión normal para la madera de pino radiata en estado seco, con un contenido de humedad del 12%. Para esto, se obtuvo el valor medio de la tensión en el límite de proporcionalidad, el cual fue ponderado por un factor de reducción igual a 0.6 para obtener valores admisibles desde las estadísticas experimentales, establecido en la Tabla 9 de la norma ASTM D245. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 2. 3: Resultados globales, compresión perpendicular, estado seco H=12%.

Grado	Densidad anhidra (Do)		Tensión límite de proporcionalidad ($F_{cn,lp}$)		Tensión admisible (F_{cn})	Índice de aplastamiento ($E_{cn,h}$)	
	(Kg/m ³)		(MPa)		(MPa)	(MPa/mm)	
	prom	5%	prom	c.v.		prom	c.v.
GS	439	357	7,86	0,26	4,71	5,65	0,27
G1 G2	450	361	9,90	0,19	5,93	6,43	0,25

Fuente: Wagner, M. (s.f).

Se menciona que, en la normativa de Estados Unidos, la tensión admisible de compresión normal a la fibra se derivaba tradicionalmente del límite de proporcionalidad. Sin embargo, se encontró que este método era excesivamente conservador en ciertas condiciones de diseño. A partir de 1982, los valores de resistencia se han ajustado tomando en cuenta tanto la tensión en el límite de proporcionalidad como la tensión inherente a un aplastamiento de 1 mm. Pero, para algunas especies de madera en particular, se ha observado que el nivel de deformación asociado al límite de proporcionalidad es menor a 1 mm. Por lo tanto, si se espera una deformación de 1 mm, se puede incrementar el valor de la tensión admisible de compresión normal. También, el factor de ajuste para

las tensiones de compresión normal, tanto en el límite de proporcionalidad como para el aplastamiento de 1 mm, es de 1.67 en Estados Unidos. Este valor se basa en el "efecto de la desangulación de los anillos anuales". Para madera con anillos desangulados en aproximadamente 45°, la tensión es aproximadamente el 60% de la tensión para otras orientaciones.

Tomando en consideración estas premisas, se aplicó el factor de ajuste de 1.67 sobre la tensión media y se analizaron las probetas clasificadas como GS, que presentó un rendimiento inferior en las propiedades perpendiculares a la fibra. Los resultados obtenidos en el revelan que, a diferencia de los resultados en Estados Unidos, la tensión en el límite de proporcionalidad estudio para el pino radiata prácticamente duplica la tensión correspondiente al aplastamiento de 1 mm. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el estudio:

Tabla 2. 4: Comparación de criterios considerados para cálculo de tensión admisible.

Grado	Contenido de Humedad	Criterio lim. pr. (MPa)		Criterio 1 mm (MPa)		Tensión Admisible (MPa)
		prom	c.v.	prom	c.v.	
GS	H=12 %	7,86	0,26	4,22	0,32	2,5
GS	H ≥ 30%	3,68	0,28	2,49	0,28	1.5

Fuente: Wagner, M. (s.f.).

Donde se destaca que el valor de tensión admisible obtenido con el criterio de deformación a 1 mm, coincide con el valor vigente en la normativa de diseño NCh1198 para todos los grados de madera Pino Radiata.

2.9 Conclusiones

Este capítulo ha abordado en detalle el comportamiento de la madera como material estructural frente a cargas de compresión, especialmente aquellas que actúan perpendicularmente a la dirección de su fibra, donde se ha enfatizado la importancia de comprender tal comportamiento, ya que esto permite evaluar su capacidad estructural y diseñar sistemas constructivos eficientes y seguros. La revisión de las normativas vigentes y el análisis bibliográfico existente han proporcionado un contexto amplio y actualizado sobre los métodos de determinación de resistencia a compresión normal en elementos de madera, y su interacción en distintas condiciones de apoyo.

CAPITULO 3 METODOLOGÍA DE ENSAYOS DE LABORATORIO

3.1 Introducción

En este capítulo, se proporciona una descripción completa de los materiales utilizados en el laboratorio, incluyendo los equipos y las piezas ensayadas. Además, se presenta la metodología utilizada en cada tipo de ensayo, junto con las variables consideradas. También se describe el proceso de recolección de datos a partir de las curvas carga-deformación obtenidas en el laboratorio. Además, se incluyen los métodos de análisis estadísticos aplicados a los datos obtenidos, lo que permite una evaluación más precisa y rigurosa de los resultados.

3.2 Ensayos considerados

En base a el análisis bibliográfico realizado en el capítulo anterior, se consideró llevar a cabo ensayos de acuerdo con los métodos actuales establecidos por el Instituto Nacional de Normalización (INN) en las normas NCh 974 y NCh 3028-1 para evaluar la resistencia a la compresión normal a la fibra de elementos de madera en interacción con una y dos placas de metal, respectivamente.

Además de eso, se consideró llevar a cabo ensayos cíclicos de carga y descarga utilizando probetas con características similares a las utilizadas en los ensayos según la norma NCh 974 (Figura 3.1). El objetivo principal de estos ensayos consistió en representar e interpretar el comportamiento de los pies derechos de los muros de corte en relación con su solera inferior bajo cargas dinámicas. Dichas cargas generan momentos volcantes tanto dentro como fuera del plano del muro, con un enfoque particular en el momento volcante presente en su plano, el cual ocasiona un efecto secuencial de tracción y compresión en los extremos del muro. La Figura 3.3 ilustra visualmente la aplicación de las cargas dinámicas sobre el muro.

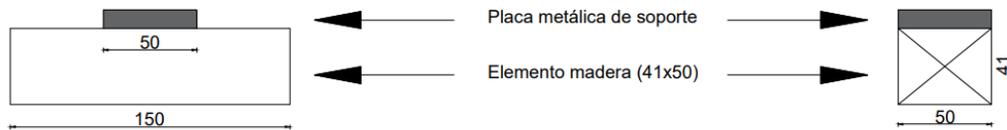


Figura 3. 1: Esquema utilizado para ensayos cíclicos y método según NCh 974.

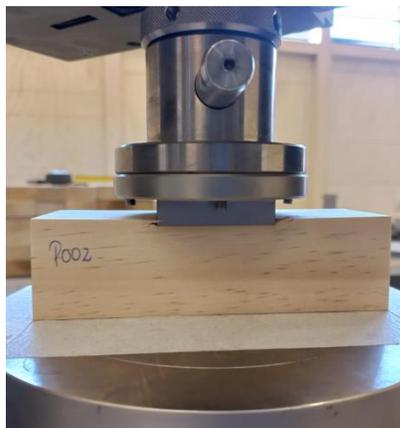


Figura 3. 2: Implementación de ensayos cíclicos y método según NCh 974.

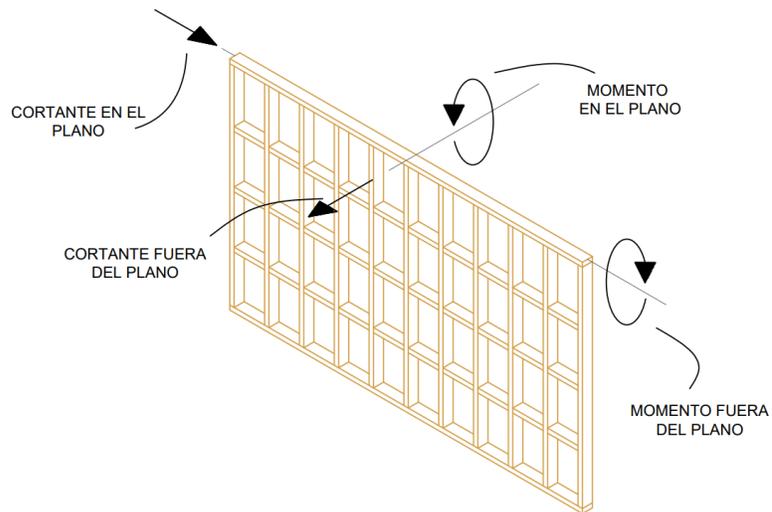


Figura 3. 3: Representación de muro de corte y cargas dinámicas.

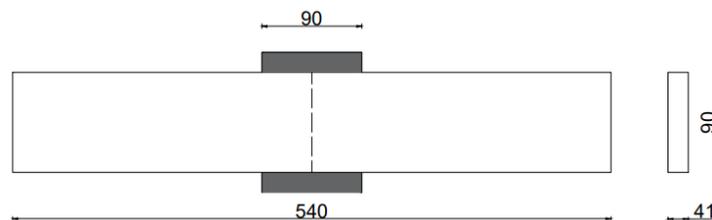


Figura 3. 4: Esquema de ensayo según NCh 3028-1.



Figura 3. 5: Implementación de ensayo según NCh 3028-1.

Además, se llevaron a cabo ensayos utilizando los Esquemas A y B propuestos por Basta, CT, Gupta, R., Leichti, RJ y Sinha, A. (2011), los cuales tuvieron una representación precisa de la interacción madera-madera en una estructura de altura mediana. Estos ensayos se centran en la interacción entre las vigas del entrepiso y la conexión del pie derecho de un muro con su solera inferior, como se muestra detalladamente en la Figura 3.10. Para la realización de estos ensayos, se utilizaron elementos de madera con escuadrías específicas, las cuales se detallan de manera exhaustiva en la Tabla 3.1.

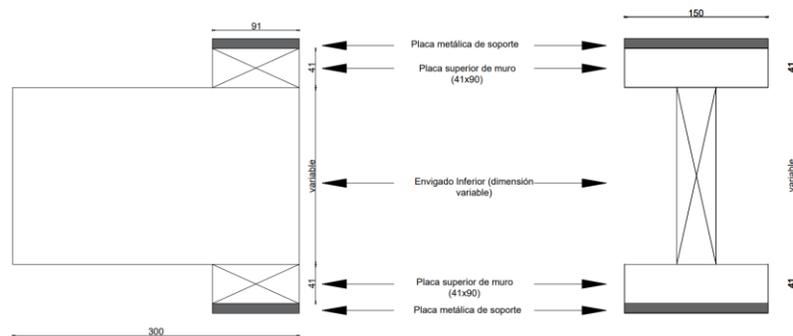


Figura 3. 6: Esquema de ensayo según Esquema A de Basta *et al* (2011).

Adicionalmente, se tomó en consideración la realización de un ensayo mediante una modificación del Esquema A ilustrado en la Figura 3.6. En este caso, la probeta de madera que representa el envigado de entrepiso se carga en su centro, con el fin de evaluar el comportamiento y la contribución de resistencia de la porción no cargada adyacente al área bajo carga. Esto se puede apreciar en la siguiente Figura 3.11.



Figura 3. 7: Implementación de ensayo según Esquema A de Basta *et al* (2011).

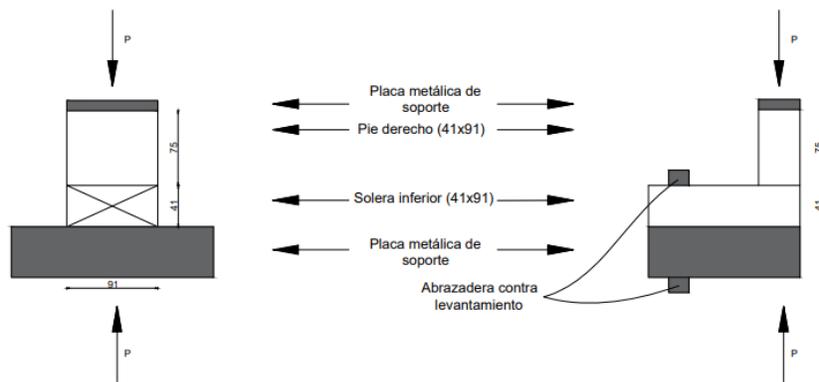


Figura 3. 8: Esquema de ensayo según Esquema B de Basta *et al* (2011).



Figura 3. 9: Implementación de ensayo según Esquema B de Basta *et al* (2011).

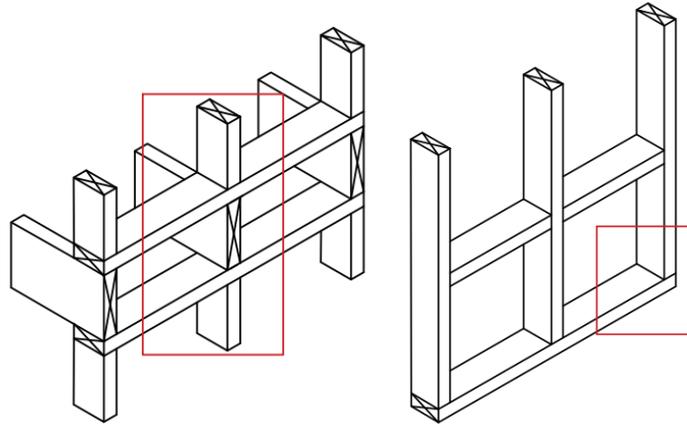


Figura 3. 10: Representación de envidado de entrespiso (Esquema A) y base de muro de tabiquería (Esquema B).

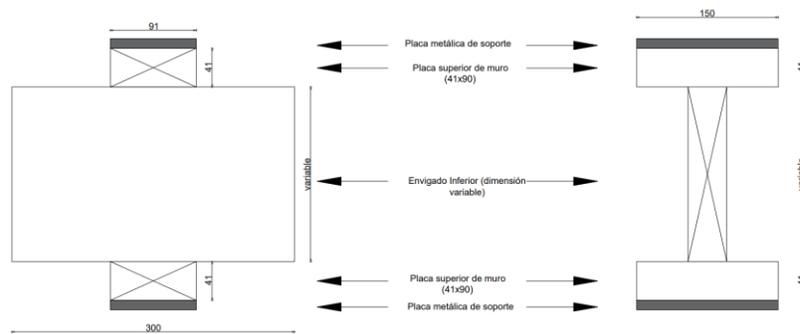


Figura 3. 11: Esquema de ensayo Esquema A cargado en el centro.



Figura 3. 12: Implementación de ensayo según Esquema A cargado en el centro.

3.3 Equipos y materiales

Para la realización de cada uno de los ensayos, se utilizó el equipamiento y materiales facilitados por el Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal, Sede Bio Bio. Estas instalaciones y recursos fueron fundamentales para garantizar la correcta ejecución de los ensayos y obtener resultados fiables y precisos.

3.3.1 ZwickRoell ProLine Z100

Máquina de ensayos universales, con capacidad de hasta 100 kN de fuerza aplicada en ensayo, con alta precisión de toma de datos, con la cual es posible realizar ensayos tanto de compresión, flexión como a tracción, de la marca alemana ZwickRoell modelo ProLine Z100 y velocidad de travesaño entre 0.0005 y 300 mm/min el cual se opera con un computador estándar combinado con el software de ensayos TestXpert III de ZwickRoell. (ZwickRoell, s.f.)



Figura 3. 13: Máquina de ensayos universal ZwickRoell ProLine Z100.
Fuente: (ZwickRoell, s.f)

3.3.2 Pie de metro digital

Instrumento digital de medición con un rango de 0 a 300mm, utilizado para el registro de las dimensiones en mm de cada una de las probetas ensayadas.



Figura 3. 14: Pie de metro digital.

Fuente: (Imperial, s.f.)

3.3.3 Medidor de humedad L610 para cámara de secado

Xilohigrómetro profesional para cámaras de secado modelo L610 con rango de humedad de 5 a 30% y profundidad de medición de 3cm. Este instrumento fue utilizado para el registro de humedad de las probetas utilizados en cada uno de los ensayos de laboratorio. (ProdTech, s.f.)



Figura 3. 15: Medidor de humedad L610.

Fuente: (ProdTech, s.f.)

3.3.4 Probetas de madera Pino Radiata

Para la realización de cada uno de los ensayos, se emplearon probetas de Pino Radiata que se caracterizan por estar libres de defectos. Se optó por este enfoque más conservador, ya que la presencia de nudos en los elementos de madera podría aumentar la resistencia normal a la fibra debido a la mayor densidad que presentan, limitando así la deformación local del elemento (Formolo y Granström, 2007).

Es importante destacar que, al realizar los ensayos, se tuvo en cuenta la disponibilidad de material presente en el Laboratorio de Madera Estructural (LME). Si bien la norma NCh 974 especifica ciertas dimensiones para las probetas, se ha utilizado material de menor escuadría en este estudio debido a las limitaciones de disponibilidad. Con el fin de presentar de manera clara y concisa la información relacionada con las probetas utilizadas, se ha incluido la Tabla 3.1, donde se detallan las características y dimensiones específicas de los especímenes empleados en los ensayos.

Tabla 3. 1: Dimensiones y cantidad de probetas.

Tipo de Ensayo		Cantidad de Ensayos	Cantidad de Probetas	Escuadría (mm)	Largo (mm)
NCh 3028-1		102	102	41x90	540
NCh 974		102	102	41x50	150
NCh 974 Carga-Descarga		70	70	41x50	150
Basta <i>et al</i> (2011) Esquema A	Probetas 2"x4"	102	102	41x90	270
			724	41x90	150
	Probetas 2"x6"	102	102	41x140	300
	Probetas 2"x8"	102	102	41x180	300
Esquema A cargado en el centro	Probetas 2"x6"	28	28	41x150	300
	Probetas 2"x8"	28	28	41x180	300
Basta <i>et al</i> (2011) Esquema B		102	102	41x90	150
			102	41x90	75

3.4 Metodología de Ensayos

Principalmente, y de manera independiente al tipo de ensayo llevado a cabo, se realizó un registro de cada una de las probetas antes de ser sometido a los ensayos. En este registro se tomaron medidas de sus dimensiones en milímetros (mm), peso en gramos (g), densidad en kilogramo por metro cúbico (kg/m^3) y contenido de humedad en porcentaje (%). Después de esta etapa del proceso, se identificaron algunas variables que deberán tenerse en cuenta para la realización de los ensayos. Dentro de las variables consideradas en este estudio se encuentran la velocidad de aplicación de carga en milímetros por minuto (mm/min), la deformación final experimentada durante el ensayo y la precarga aplicada previa al registro de datos en la máquina universal de ensayos. Es importante destacar que el valor de precarga utilizado fue de 30 Newtons (N) y se mantuvo constante en todos los ensayos, independientemente del tipo de esquema utilizado. Esta precarga garantiza que los datos registrados por la máquina de ensayos sean consistentes a partir del momento en que el plato

de carga encuentre una resistencia al desplazamiento, evitando así posibles variaciones de deformación causadas por el acomodo del plato sobre el elemento cargado o por pequeñas irregularidades presentes en el canto de este último. A continuación, se presentan las variables específicas consideradas para cada uno de los tipos de ensayos:

Tabla 3. 2: Velocidad de carga y deformación final de cada tipo de ensayo.

Tipo de ensayo		Velocidad de carga (mm/min)	Deformación al final del ensayo (mm)
NCh 3028-1		10	10
NCh 974		0.3	5
NCh 974 Carga-Descarga		0.3	5
Basta <i>et al</i> (2011) Esquema A	Probetas 2"x4"	3.3	8
	Probetas 2"x6"	3.3	8
	Probetas 2"x8"	3.3	7
Esquema A cargado en el centro	Probetas 2"x6"	3.3	10
	Probetas 2"x8"	3.3	10
Basta <i>et al</i> (2011) Esquema B		0.76	5

Las velocidades de carga utilizadas en los ensayos según la norma NCh 974 se ajustaron al procedimiento especificado en la normativa vigente. Para los ensayos según la norma NCh 3028-1, se empleó una velocidad de carga de 10 mm/min, con el objetivo de alcanzar una deformación final de 1 mm, tal como se indica en la normativa correspondiente. Se redujo la deformación final de 20 mm a 10 mm, ya que la información obtenida más allá de los 5 mm de deformación no resultó relevante. Esto se debe a que el material ya alcanza el rango de plástico antes de dicha deformación. En cuanto a los ensayos realizados según Basta *et al* (2011), se adoptaron las velocidades de carga utilizadas por los autores en su estudio, las cuales se detallan en la Tabla 2.2. Es importante destacar que no se diferenció la velocidad de carga en función de la sección transversal de las diferentes probetas, por lo que se obtuvo la misma velocidad de 3.3 mm/min para todos los ensayos del Esquema A.

En el caso de los ensayos cíclicos, se tomó como referencia el protocolo CUREE para ensayos cíclicos, específicamente el historial de carga básica. El objetivo de este protocolo es evaluar el comportamiento sísmico a nivel de capacidad de los componentes sometidos a movimientos sísmicos de baja intensidad (Krawinkler *et al*, 2001). Sin embargo, debido a la consideración de la

capacidad de la cantidad de ciclos y la configuración de la máquina de ensayos universales, se decidió realizar una reducción de los ciclos por deformación, empleando una modificación del historial de carga básica simplificado descrito en W-02 “*development of a testing protocol for woodframe structure*”. Esta versión simplificada reemplaza los ciclos de arrastre entre los ciclos primarios por ciclos de igual amplitud a los primarios, lo que permite una ejecución más eficiente de la prueba y es más adecuado para el desarrollo de modelos analíticos (Krawinkler *et al*, 2001). Este historial se muestra gráficamente en el Anexo 3.1.

En resumen, el plan de ensayo finalmente adoptado consistió en realizar sólo ciclos de compresión, específicamente, tres ciclos de carga-descarga para cada uno de los porcentajes aplicados a la deformación de 5 mm, que fue considerada como la deformación monotónica para la ejecución del ensayo. A continuación, se muestra el detalle del plan de ensayo a considerar:

Tabla 3. 3: Número de ciclos y deformación alcanzada en cada uno para ensayos carga-descarga.

N° del ciclo	Deformación máxima alcanzada en cada ciclo en mm	
1 al 3	0.05Δ	0.25
4 al 6	0.075Δ	0.375
7 al 9	0.1Δ	0.5
10 al 12	0.2Δ	1
13 al 15	0.3Δ	1.5
16 al 18	0.4Δ	2
19 al 21	0.7Δ	3.5
22 al 24	1.0Δ	5

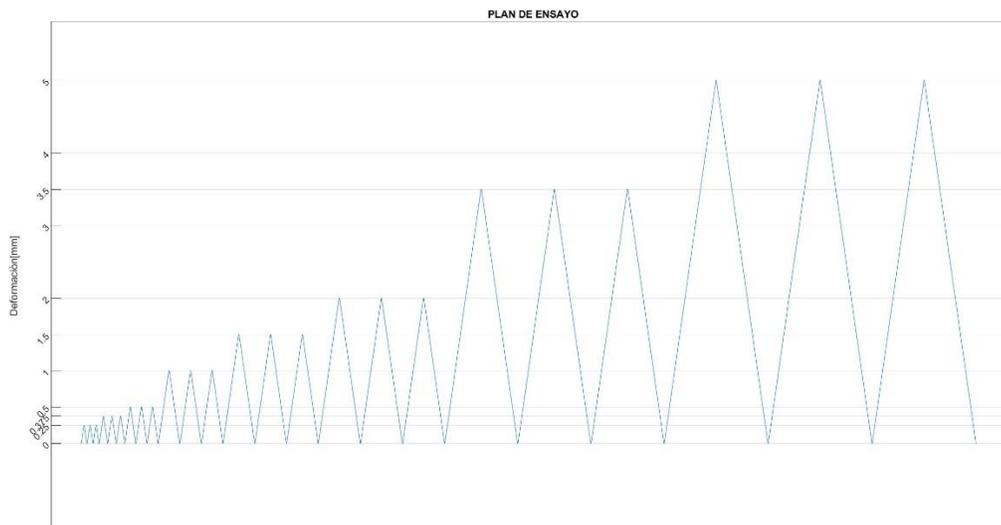


Figura 3. 16: Plan de ensayo utilizado para ensayos cíclicos.

3.5 Curvas carga - deformación promedios

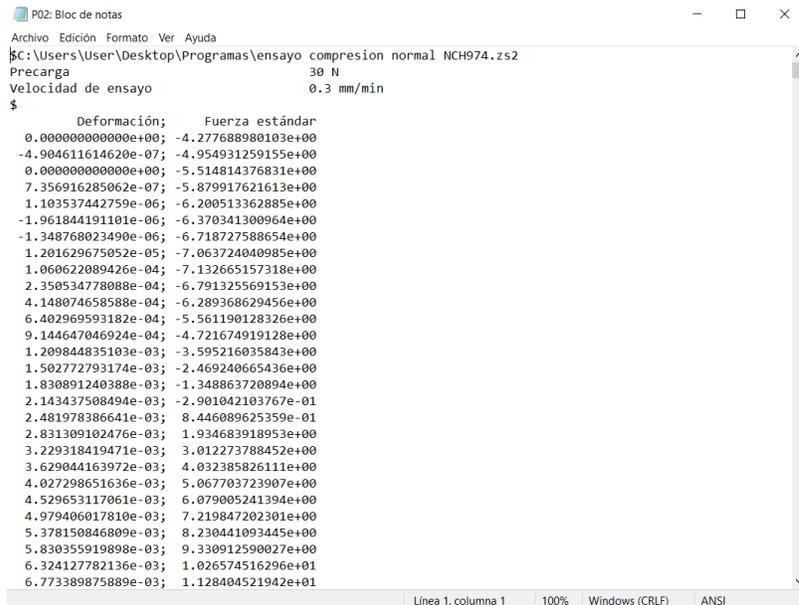
Con el fin de obtener una curva carga - deformación más representativa para cada grupo de ensayos realizados, se empleó la metodología de promediar las fuerzas de carga cada 0.1 mm de deformación en las curvas correspondientes a cada tipo de ensayo, con esto, se considera la diversidad de la respuesta mecánica en distintos puntos de la muestra y se proporciona una resolución adecuada de los datos sin sacrificar la representatividad ni eficiencia del análisis, entregando una visión detallada de las transiciones en el comportamiento del material a lo largo de la curva. En el Anexo 3.2 se presentan gráficamente las curvas asociadas a cada tipo de ensayo, destacándose la curva promedio calculada.

3.6 Extracción de datos de curvas carga vs deformación

Los datos obtenidos de la máquina de ensayos universales se presentan en un documento de texto, que muestra los valores de carga en N asociados a la deformación en mm (Figura 3.17). Estos datos son procesados posteriormente utilizando un código de programación en el *software* Matlab para generar una representación gráfica de la curva carga - deformación (Anexo 3.3). La representación visual de esta relación entre la carga aplicada y la deformación experimentada proporciona información valiosa sobre el comportamiento mecánico de la madera bajo compresión perpendicular, y facilita la identificación de los puntos críticos y las propiedades específicas del material. A partir de las curvas obtenidas, se extraen diversos datos de interés, que permiten realizar análisis comparativos y diversas evaluaciones, nombrados a continuación:

- Carga máxima alcanzada en el ensayo
- Deformación alcanzada en carga máxima
- Carga alcanzada a 1 mm de deformación (real)
- Coeficiente de determinación (R^2) de regresión lineal en rango elástico
- Intersección de recta de regresión con recta de carga igual a 0 N.
- Carga alcanzada a 1 mm “offset” de deformación
- Carga alcanzada a 2.5 mm “offset” de deformación

En el proceso de análisis de la curva carga-deformación, se realizó la construcción de una recta de regresión en el rango elástico de la curva. Para ello, se utilizaron los datos de carga correspondientes al intervalo del 10% al 40% de la carga máxima, tal como se recomienda en el punto 7.2 de la norma NCh 3028-1 para el cálculo del módulo de elasticidad en flexión. Además, se aplica el método empleado por Basta *et al* (2011), para determinar la carga alcanzada a los milímetros "offset" de deformación. Esto implica encontrar la intersección de la curva carga-deformación con la recta de regresión lineal en el rango elástico de la curva experimental, desplazada un cierto valor en dirección positiva, como se ilustra en la Figura 3.18. El coeficiente de determinación R2 se utiliza como medida de la calidad del ajuste de la recta de regresión en relación con los valores de carga entre el 10% y el 40% de la carga máxima. Este coeficiente varía entre cero y uno, siendo más cercano a uno cuanto mejor sea el ajuste del modelo a la variable que se intenta explicar. Es decir, un valor más cercano a uno indica un ajuste más preciso de la recta de regresión a los datos experimentales. (López, J., 2017).



```
P02: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
C:\Users\User\Desktop\Programas\ensayo compresion normal NCH974.zs2
Precarga 30 N
Velocidad de ensayo 0.3 mm/min
$
Deformación; Fuerza estándar
0.000000000000e+00; -4.277688980103e+00
-4.904611614620e-07; -4.954931259155e+00
0.000000000000e+00; -5.514814376831e+00
7.356916285062e-07; -5.879917621613e+00
1.103537442759e-06; -6.200513362885e+00
-1.961844191101e-06; -6.370341300964e+00
-1.348768023490e-06; -6.718727588654e+00
1.201629675052e-05; -7.063724040985e+00
1.060622089426e-04; -7.132665157318e+00
2.350534778088e-04; -6.791325569153e+00
4.148074658588e-04; -6.289368629456e+00
6.402969593182e-04; -5.561190128326e+00
9.144647046924e-04; -4.721674919128e+00
1.209844835103e-03; -3.595216035843e+00
1.502772793174e-03; -2.469240665436e+00
1.830891240388e-03; -1.348863720894e+00
2.143437508494e-03; -2.901042103767e-01
2.481978386641e-03; 8.446089625359e-01
2.831309102476e-03; 1.934683918953e+00
3.229318419471e-03; 3.012273788452e+00
3.629044163972e-03; 4.032385826111e+00
4.027298651636e-03; 5.067703723907e+00
4.529653117061e-03; 6.079005241394e+00
4.979406017810e-03; 7.219847202301e+00
5.378150846809e-03; 8.230441093445e+00
5.83035919898e-03; 9.330912590027e+00
6.324127782136e-03; 1.026574516296e+01
6.773389875889e-03; 1.128404521942e+01
Línea 1, columna 1 100% Windows (CRLF) ANSI
```

Figura 3. 17: Documento de texto con datos obtenidos en laboratorio.

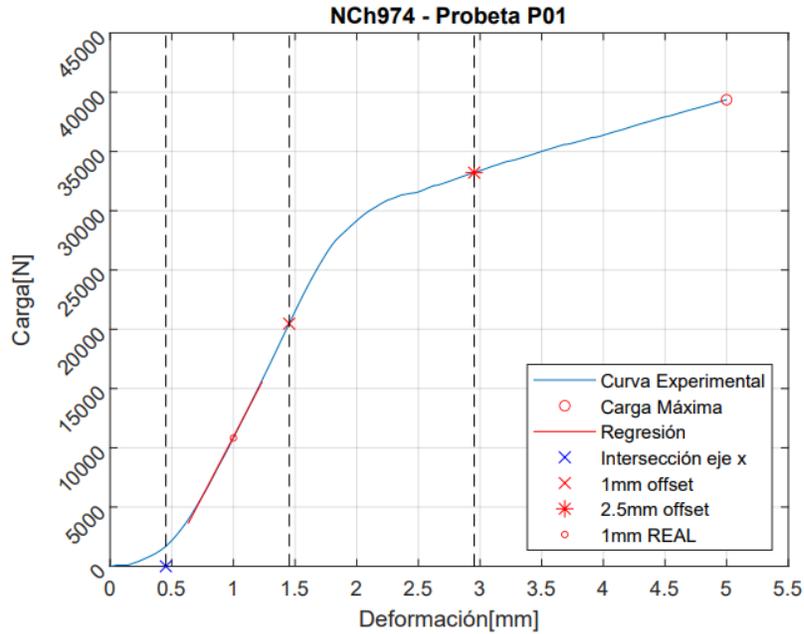


Figura 3. 17: Gráfico de los datos obtenidos en ensayo de laboratorio.

Para los ensayos cíclicos se realizó un proceso similar al descrito anteriormente, con la curva carga-deformación. Sin embargo, en este caso, el objetivo fue obtener y comparar la rigidez elástica del material en cada uno de los ciclos, presentados en la Tabla 3.3, como también la acumulación de deformaciones remanentes entre ellos. En el Anexo 3.4, se presenta un extracto del documento de texto entregado por la máquina de ensayos universales para este tipo de ensayos, así como los gráficos generados mediante el *software* Matlab.

3.7 Tensión de trabajo en elementos en compresión normal a la fibra

La tensión de trabajo se determinó según el punto 7.5.1 de la normativa chilena de diseño NCh 1198:2014, para cada probeta ensayada según la expresión siguiente:

$$f_{cn} = \frac{R}{A_n} \tag{3.1}$$

Donde:

f_{cn} = tensión de trabajo por aplastamiento, expresada en megapascales (MPa);

R = carga aplicada a deformación necesitada en Newton (N);

A_n = sección neta aplastada, expresada en milímetros cuadrados (mm^2).

3.8 Rigidez rango elástico lineal

Para determinar la rigidez del rango elástico del material, se obtiene la pendiente de la zona elástica lineal de la curva carga-deformación entre el rango de 10% a 40% de la carga máxima del ensayo, según lo especificado en el punto 7.2 de la normativa NCh 3028-1.

3.9 Conclusiones

Este capítulo ha proporcionado una visión detallada de los materiales utilizados en el laboratorio, la metodología empleada en los ensayos y el proceso de recolección de datos. Asimismo, se han presentado los métodos de análisis estadísticos aplicados a los datos obtenidos. En resumen, este capítulo establece las bases para la presentación, análisis e interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos.

CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Introducción

En este capítulo, se completan los resultados obtenidos en los ensayos realizados, junto con un análisis de estadística descriptiva realizado según lo descrito en el Anexo 4.1, para proporcionar un enfoque más detallado y cuantitativo de los datos recopilados. Este análisis permite una comprensión más profunda de las tendencias y variaciones presentes en los resultados. Además, se realiza una comparación entre los ensayos realizados de los valores de resistencia a compresión normal, rigidez elástica lineal y deformaciones experimentadas. Esto permite evaluar la respuesta estructural de los elementos ensayados y comprender mejor su comportamiento bajo carga.

4.2 Datos de registro de probetas

Como se expuso en el capítulo anterior, como paso previo a la ejecución de los ensayos, fue necesario llevar a cabo un riguroso registro de las probetas, en aras de proporcionar una visión general de las propiedades físicas de dichas probetas. Se presenta a continuación una tabla resumen que incluye datos sobre el contenido de humedad y la densidad de las probetas utilizadas en los ensayos realizados en laboratorio:

Tabla 4. 1: Tabla resumen de propiedades físicas de probetas por ensayo.

Tipo de Ensayo		NCh 3028-1	NCh 974	NCh 974 Ensayos cíclicos	Esquema A Basta <i>et al</i> (2011)			Esquema A cargado en el centro		Esquema B Basta <i>et al</i> (2011)
					Probetas 2"x4"	Probetas 2"x6"	Probetas 2"x8"	Probetas 2"x6"	Probetas 2"x8"	
Contenido de Humedad (%)	Promedio	12.0	9.4	9.7	11.7	11.1	12.0	11.3	12.1	11.5
	Desviación Estándar	1.3	0.7	0.9	1.2	1.0	1.0	0.8	1.0	1.2
	CV(%)	10.8%	7.9%	9.0%	10.6%	9.4%	8.3%	7.3%	8.2%	10.0%
Densidad (kg/m ³)	Promedio	475.9	479.9	488.4	478.6	454.1	484.2	464.5	478.1	478.5
	Desviación Estándar	52.8	39.0	36.2	51.3	39.6	37.7	31.6	37.7	50.6
	CV(%)	11.1%	8.1%	7.4%	10.7%	8.7%	7.8%	6.8%	7.9%	10.6%

La inclusión del contenido de humedad y la densidad en esta tabla resumen permite evaluar la influencia de estos parámetros en los resultados de los ensayos. La desviación estándar revela la dispersión de los valores obtenidos, mientras que el promedio proporciona una medida

representativa de la tendencia central de los datos. Por su parte, el coeficiente de variación permite comprender la relativa de los valores en relación con su promedio, donde, de la tabla anterior se observa que los datos tienen una alta homogeneidad ($CV < 12\%$) y que las probetas se encuentran dentro del rango de estado seco ($CH \approx 12\%$).

4.3 Ensayo según NCh974

A continuación, se presentan en forma de resumen, los datos extraídos de los ensayos según la metodología mencionada en el capítulo anterior para los ensayos realizados según la NCh 974:

Tabla 4. 2: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos NCh 974.

	Fuerza máxima (N)	Rigidez (N/mm)	1mm	1 mm <i>Offset</i>		2.5 mm <i>Offset</i>	
			Fuerza (N)	Fuerza (N)	Deformación (mm)	Fuerza(N)	Deformación (mm)
Valor máximo	47,321.4	33,960.6	27,215.4	31,733.7	1.5	42,374.8	3.0
Valor mínimo	18,733.2	16,151.1	10,834.7	14,270.5	1.1	16,316.3	2.6
Rango	28,588.2	17,809.5	16,380.7	17,463.2	0.3	26,058.5	0.3
Promedio	29,803.8	23,524.4	17,605.8	20,588.0	1.2	26,070.2	2.7
Desviación estándar	6,173.1	4,381.4	3,376.3	3,645.1	0.1	5,209.8	0.1
CV (%)	20.7%	18.6%	19.2%	17.7%	3.7%	20.0%	1.7%

4.3.1 Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal

Para el cálculo de la tensión de trabajo asociada a cada una de las deformaciones consideradas, se consideró un área neta aplastada según:

$$A_n = \text{ancho de placa metálica} * \text{ancho de probeta} = 50 * 50 = 2500 \text{ mm}^2 \quad (4.2)$$

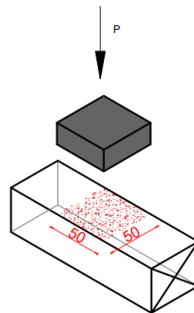


Figura 4. 1: Representación de área cargada para ensayos según NCh 974.

A continuación, se proporcionan tablas resumen que contienen los resultados del análisis de estadística descriptiva de las resistencias a compresión normal obtenidos a través del ensayo conforme a la normativa NCh 974. Asimismo, se incluyen valores de resistencia asociados a un límite de tolerancia del 5%, según lo establecido en la normativa NCh 3028-2 (Anexo 4.2). Además, se presentan los valores admisibles calculados mediante la aplicación del factor de ajuste definido en la NCh 3028-2 (Anexo 4.3).

Tabla 4. 3: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo NCh 974.

Rcn (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
Valor máximo	10.9	12.7	16.9
Valor mínimo	4.3	5.7	6.5
Rango	6.5	7.0	10.4
Promedio	7.0	8.2	10.4
Desviación estándar	1.3	1.5	2.1
CV (%)	19.2%	17.7%	20.0%

Tabla 4. 4: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn según ensayo NCh 974.

Rcn, límites de tolerancia del 5% (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
Limite Tolerancia Paramétrico (LTP) 5%	4.6	5.7	6.7
Error Estándar (ES)	0.2	0.2	0.3
Limite Tolerancia No Paramétrico (LTNP) 5%	5.2	5.9	7.0
Estimador Porcentual No Paramétrico (EPN) 5%	5.2	6.3	7.7

Rcn, valores admisibles (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	2.66	3.25	3.84
LTNP 5%	3.11	3.56	4.17
EPN 5%	3.14	3.78	4.62

Se destaca la similitud del valor admisible obtenido a 1 mm de deformación de ensayo, considerando el límite de tolerancia paramétrico (LTP), con el valor de tensión admisible a compresión normal a la fibra (2.5 MPa) establecida en la normativa de diseño NCh 1198:2014 (Anexo 4.4). Esta similitud también se encuentra presente con el estudio realizado por Wagner, M. (s.f.), en el que se utilizaron dimensiones de escuadría disponibles en el comercio, pero se empleó el criterio de obtener la resistencia a compresión normal a 1mm de deformación en madera de Pino Radiata, calidad GS y en estado seco. Estas últimas condiciones son análogas a las consideradas en este estudio, lo que refuerza la consistencia de los resultados obtenidos.

4.4 Ensayo según NCh 3028-1

A continuación, se presenta en forma de resumen, los datos extraídos de los ensayos según la metodología mencionada en el capítulo anterior para los ensayos según la NCh 3028-1:

Tabla 4. 5: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos NCh 3028-1.

	Fuerza máxima (N)	Rigidez (N/mm)	1mm	1 mm <i>Offset</i>		2.5 mm <i>Offset</i>	
			Fuerza (N)	Fuerza (N)	Deformación (mm)	Fuerza(N)	Deformación (mm)
Valor máximo	56,362.3	21,497.2	17,101.0	21,208.0	1.6	39,564.7	3.1
Valor mínimo	21,575.2	5,630.5	1,087.2	5,677.3	1.1	13,589.2	2.6
Rango	34,787.1	15,866.7	16,013.8	15,530.7	0.5	25,975.5	0.5
Promedio	36,726.8	13,886.6	10,531.3	13,836.5	1.2	26,776.4	2.7
Desviación estándar	7,787.4	3,255.2	3,029.7	3,202.3	0.1	5,525.2	0.1
CV (%)	21.2%	23.4%	28.8%	23.1%	5.7%	20.6%	2.6%

4.4.1 Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal.

Para el cálculo de la tensión de trabajo asociada a cada una de las deformaciones consideradas, se consideró un área neta aplastada según:

$$A_n = \text{ancho de placa metálica} * \text{ancho de probeta} = 90 * 41 = 3600 \text{ mm}^2 \quad (4.2)$$

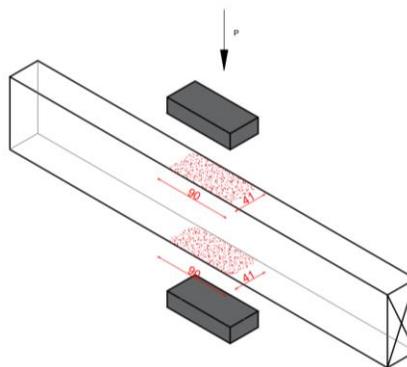


Figura 4. 2: Representación de área cargada para ensayos según NCh 3028-1.

A continuación, se proporcionan tablas resumen que contienen los resultados del análisis de estadística descriptiva de las resistencias a compresión normal obtenidos a través del ensayo conforme a la normativa NCh 3028-1. Asimismo, se incluyen los de resistencia asociados a un

límite de tolerancia del 5%, según lo establecido en la normativa NCh 3028-2 (Anexo 4.2). Además, se presentan los valores admisibles calculados mediante la aplicación del factor de ajuste definido en la NCh 3028-2 (Anexo 4.3).

Tabla 4. 6: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo NCh 3028-1.

Rcn (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
Valor máximo	4.7	5.7	10.4
Valor mínimo	0.3	1.5	3.6
Rango	4.4	4.2	6.8
Promedio	2.8	3.7	7.1
Desviación estándar	0.8	0.8	1.4
CV (%)	28.2%	22.5%	19.9%

Tabla 4. 7: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo según NCh 3028-1.

Rcn, límites de tolerancia del 5% (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	1.4	2.2	4.6
ES	0.1	0.1	0.2
LTNP 5%	1.5	2.4	4.7
EPN 5%	1.7	2.4	4.9

Rcn, valores admisibles (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	0.77	1.25	2.63
LTNP 5%	0.91	1.43	2.82
EPN 5%	1.00	1.46	2.91

Se destaca la similitud del valor admisible obtenido a 2.5 mm de deformación de ensayo sin considerar el acomodo inicial experimentado (*offset*), considerando el límite de tolerancia paramétrico (LTP), con el valor de tensión admisible a compresión normal a la fibra (2.5 MPa) establecida en la normativa de diseño NCh 1198:2014 (Anexo 4.4).

4.5 Ensayo según esquema A de Basta *et al* (2011) con probetas 2”x4”

A continuación, se presenta en forma de resumen, los datos extraídos de los ensayos según la metodología mencionada en el capítulo anterior para los ensayos según el Esquema A de Basta *et al* (2011) utilizando probetas de 2”x4”:

Tabla 4. 8: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos Esquema A con probetas 2"x4".

			1mm	1 mm <i>Offset</i>		2.5 mm <i>Offset</i>	
	Fuerza máxima (N)	Rigidez (N/mm)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Deformación (mm)	Fuerza(N)	Deformación (mm)
Valor máximo	39,760.6	13,099.9	2,353.0	13,129.0	2.9	29,087.5	4.4
Valor mínimo	17,087.1	4,752.6	41.2	4,698.9	1.7	12,482.3	3.2
Rango	22,673.5	8,347.3	2,311.8	8,430.1	1.1	16,605.2	1.1
Promedio	26,801.4	8,035.3	764.3	8,020.1	2.2	18,906.0	3.7
Desviación estándar	4,819.1	1,634.7	477.1	1,663.1	0.2	3,442.2	0.2
CV (%)	18.0%	20.3%	62.4%	20.7%	10.8%	18.2%	6.4%

4.5.1 Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal

Para el cálculo de la tensión de trabajo asociada a cada una de las deformaciones consideradas, se consideró un área neta aplastada según:

$$A_n = \text{ancho de placa metálica} * \text{ancho de probeta} = 90 * 41 = 3600 \text{ mm}^2 \tag{4. 3}$$

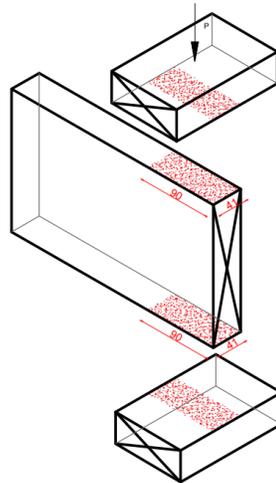


Figura 4. 3: Representación de área cargada para ensayos según Esquema A Basta *et al* (2011).

A continuación, se proporcionan tablas resumen que contienen los resultados del análisis de estadística descriptiva de las resistencias a compresión normal obtenidos a través del ensayo. Asimismo, se incluyen los de resistencia asociados a un límite de tolerancia del 5%, según lo establecido en la normativa NCh 3028-2 (Anexo 4.2). Además, se presentan valores de resistencia calculados mediante la aplicación del factor de ajuste definido en la NCh 3028-2 (Anexo 4.3). Estos

últimos se consideran sólo de referencia, ya que como estos tipos de ensayos no se encuentran en la normativa, no es válido denominarlos como admisibles.

Tabla 4. 9: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x4".

Rcn (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
Valor máximo	0.7	3.4	7.5
Valor mínimo	0.01	1.2	3.3
Rango	0.6	2.2	4.3
Promedio	0.2	2.1	5.0
Desviación estándar	0.1	0.4	0.9
CV (%)	63.1%	20.5%	17.9%

Tabla 4. 10: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x4".

Rcn, límites de tolerancia del 5% (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	-0.02	1.37	3.46
ES	0.02	0.07	0.14

LTNP 5%	0.005	1.5	3.4
EPN 5%	0.013	1.5	3.5

Rcn, valores admisibles referenciales (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	-0.03	0.78	1.99
LTNP 5%	0.003	0.88	2.06
EPN 5%	0.008	0.90	2.12

Se destaca la invalidez del valor de resistencia a 1mm obtenido mediante el LTP, debido a que, con las expresiones utilizadas para el cálculo, presentes en la normativa, junto al bajo valor de resistencia obtenido en este ensayo a 1mm de deformación y alta desviación de este, se obtiene un valor negativo, lo cual no es correcto.

4.6 Ensayo según esquema A de Basta *et al* (2011) con probetas 2"x6"

A continuación, se presenta en forma de resumen, los datos extraídos de los ensayos según la metodología mencionada en el capítulo anterior para los ensayos según el Esquema A de Basta *et al* (2011) utilizando probetas de 2"x6":

Tabla 4. 11: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos Esquema A con probetas 2"x6".

	Fuerza máxima (N)	Rigidez (N/mm)	1mm	1 mm <i>Offset</i>		2.5 mm <i>Offset</i>	
			Fuerza (N)	Fuerza (N)	Deformación (mm)	Fuerza(N)	Deformación (mm)
Valor máximo	30,120.9	9,659.8	6,652.8	9,673.3	1.8	22,046.7	3.3
Valor mínimo	14,976.2	3,821.1	1,461.3	3,713.0	1.2	10,181.5	2.7
Rango	15,144.7	5,838.7	5,191.5	5,960.3	0.5	11,865.2	0.5
Promedio	21,228.0	6,389.3	3,555.1	6,364.3	1.5	15,177.3	3.0
Desviación estándar	2,971.8	1,267.6	1,093.6	1,293.6	0.1	2,374.3	0.1
CV (%)	14.0%	19.8%	30.8%	20.3%	7.2%	15.6%	3.6%

4.6.1 Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal

Para el cálculo de la tensión de trabajo asociada a cada una de las deformaciones consideradas, se calculó un área neta aplastada según:

$$A_n = \text{ancho de placa metálica} * \text{ancho de probeta} = 90 * 41 = 3600 \text{ mm}^2 \quad (4.4)$$

A continuación, se proporcionan tablas resumen que contienen los resultados del análisis de estadística descriptiva de las resistencias a compresión normal obtenidos a través del ensayo. Asimismo, se incluyen los de resistencia asociados a un límite de tolerancia del 5%, según lo establecido en la normativa NCh 3028-2 (Anexo 4.2). Además, se presentan valores de resistencia calculados mediante la aplicación del factor de ajuste definido en la NCh 3028-2 (Anexo 4.3). Estos últimos se consideran sólo de referencia, ya que como estos tipos de ensayos no se encuentran en la normativa, no es válido denominarlos como admisibles.

Tabla 4. 12: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x6".

	Rcn (MPa)		
	1mm	1mm <i>offset</i>	2.5mm <i>offset</i>
Valor máximo	1.8	2.6	5.9
Valor mínimo	0.4	1.0	2.7
Rango	1.4	1.6	3.2
Promedio	1.0	1.7	4.1
Desviación estándar	0.3	0.3	0.6
CV (%)	30.6%	20.1%	15.5%

Tabla 4. 13: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x6".

Rcn, límites de tolerancia del 5% (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	0.4	1.1	3.0
ES	0.05	0.1	0.1
LTNP 5%	0.5	1.1	3.0
EPN 5%	0.5	1.2	3.1

Rcn, valores admisibles referenciales (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	0.24	0.63	1.72
LTNP 5%	0.29	0.68	1.81
EPN 5%	0.29	0.70	1.83

4.7 Ensayo según esquema A de Basta *et al* (2011) con probetas 2"x8"

A continuación, se presenta en forma de resumen, los datos extraídos de los ensayos según la metodología mencionada en el capítulo anterior para los ensayos según el Esquema A de Basta *et al* (2011) utilizando probetas de 2"x8":

Tabla 4. 14: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos Esquema A con probetas 2"x8".

	Fuerza máxima (N)	Rigidez (N/mm)	1mm	1 mm Offset		2.5 mm Offset	
			Fuerza (N)	Fuerza (N)	Deformación (mm)	Fuerza(N)	Deformación (mm)
Valor máximo	33,690.4	9,285.8	8,099.5	9,303.6	2.0	21,360.0	3.5
Valor mínimo	15,840.1	2,901.0	844.6	2,913.1	1.1	7,215.9	2.6
Rango	17,850.3	6,384.8	7,254.9	6,390.5	0.9	14,144.1	0.9
Promedio	24,543.5	6,005.6	2,900.3	5,978.3	1.6	14,459.4	3.1
Desviación estándar	3,619.1	1,332.2	1,309.7	1,341.6	0.2	2,921.2	0.2
CV (%)	14.7%	22.2%	45.2%	22.4%	12.3%	20.2%	6.3%

4.7.1 Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal

Para el cálculo de la tensión de trabajo asociada a cada una de las deformaciones consideradas, se consideró un área neta aplastada según:

$$A_n = \text{ancho de placa metálica} * \text{ancho de probeta} = 90 * 41 = 3600 \text{ mm}^2 \quad (4.5)$$

A continuación, se proporcionan tablas resumen que contienen los resultados del análisis de estadística descriptiva de las resistencias a compresión normal obtenidos a través del ensayo.

Asimismo, se incluyen los de resistencia asociados a un límite de tolerancia del 5%, según lo establecido en la normativa NCh 3028-2 (Anexo 4.2). Además, se presentan valores de resistencia calculados mediante la aplicación del factor de ajuste definido en la NCh 3028-2 (Anexo 4.3). Estos últimos se consideran sólo de referencia, ya que como estos tipos de ensayos no se encuentran en la normativa, no es válido denominarlos como admisibles.

Tabla 4. 15: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x8".

Rcn (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
Valor máximo	2.2	2.5	5.8
Valor mínimo	0.2	0.8	1.9
Rango	2.0	1.7	3.8
Promedio	0.8	1.6	3.9
Desviación estándar	0.4	0.4	0.8
CV (%)	45.1%	22.4%	20.2%

Tabla 4. 16: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo Esquema A probetas 2"x8".

Rcn, límites de tolerancia del 5% (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	0.2	1.0	2.5
ES	0.1	0.1	0.1

LTNP 5%	0.3	0.9	2.3
EPN 5%	0.3	1.0	2.5

Rcn, valores admisibles referenciales (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	0.1	0.6	1.4
LTNP 5%	0.2	0.6	1.4
EPN 5%	0.2	0.6	1.5

4.8 Ensayo según esquema B de Basta *et al* (2011)

A continuación, se presenta en forma de resumen, los datos extraídos de los ensayos según la metodología mencionada en el capítulo anterior para los ensayos según el Esquema B de Basta *et al* (2011) utilizando probetas de 2"x4":

Tabla 4. 17: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos Esquema B.

	Fuerza máxima (N)	Rigidez (N/mm)	1mm	1 mm <i>Offset</i>	2.5 mm <i>Offset</i>	Fuerza(N)	Deformación (mm)
			Fuerza (N)	Fuerza (N)	Deformación (mm)		
Valor máximo	58,615.8	32,406.7	12,824.0	32,377.5	2.1	53,809.4	3.6
Valor mínimo	23,344.4	13,131.1	838.8	13,752.0	1.5	21,506.8	3.0
Rango	35,271.4	19,275.6	11,985.2	18,625.5	0.6	32,302.6	0.6
Promedio	36,284.6	21,236.0	4,735.5	21,246.0	1.8	32,916.4	3.3
Desviación estándar	7,033.3	4,348.3	2,373.3	4,188.3	0.1	6,241.4	0.1
CV (%)	19.4%	20.5%	50.1%	19.7%	7.4%	19.0%	4.0%

4.8.1 Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal

Para el cálculo de la tensión de trabajo asociada a cada una de las deformaciones consideradas, se calculó un área neta aplastada según:

$$A_n = \text{ancho de placa metálica} * \text{ancho de probeta} = 90 * 41 = 3600 \text{ mm}^2 \tag{4. 6}$$

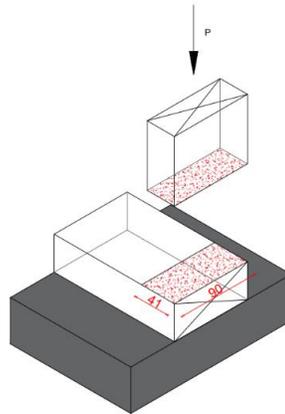


Figura 4. 4: Representación de área cargada para ensayos según Esquema B de Basta et al (2011).

A continuación, se proporcionan tablas resumen que contienen los resultados del análisis de estadística descriptiva de las resistencias a compresión normal obtenidos a través del ensayo. Asimismo, se incluyen los de resistencia asociados a un límite de tolerancia del 5%, según lo establecido en la normativa NCh 3028-2 (Anexo 4.2). Además, se presentan valores de resistencia calculados mediante la aplicación del factor de ajuste definido en la NCh 3028-2 (Anexo 4.3). Estos últimos se consideran sólo de referencia, ya que como estos tipos de ensayos no se encuentran en la normativa, no es válido denominarlos como admisibles.

Tabla 4. 18: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo Esquema B.

Rcn (MPa)			
	1mm	1mm <i>offset</i>	2.5mm <i>offset</i>
Valor máximo	3.4	8.8	14.1
Valor mínimo	0.2	3.8	5.8
Rango	3.2	5.0	8.4
Promedio	1.3	5.7	8.8
Desviación estándar	0.6	1.1	1.6
CV (%)	50.6%	19.2%	18.5%

Tabla 4. 19: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo Esquema B.

Rcn, límites de tolerancia del 5% (MPa)			
	1mm	1mm <i>offset</i>	2.5mm <i>offset</i>
LTP 5%	0.1	3.8	5.9
ES	0.1	0.2	0.2
LTNP 5%	0.3	4.1	6.1
EPN 5%	0.3	4.2	6.3

Rcn, valores admisibles referenciales (MPa)			
	1mm	1mm <i>offset</i>	2.5mm <i>offset</i>
LTP 5%	0.03	2.15	3.41
LTNP 5%	0.19	2.49	3.81
EPN 5%	0.20	2.51	3.91

4.9 Ensayo según esquema A cargado en el centro con probetas 2"x6"

A continuación, se presenta en forma de resumen, los datos extraídos de los ensayos según la metodología mencionada en el capítulo anterior para los ensayos según el esquema A cargado en el centro utilizando probetas de 2"x6":

Tabla 4. 20: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos esquema A cargado en el centro probetas 2"x6".

	Fuerza máxima (N)	Rigidez (N/mm)	1mm	1 mm <i>Offset</i>		2.5 mm <i>Offset</i>	
			Fuerza (N)	Fuerza (N)	Deformación (mm)	Fuerza(N)	Deformación (mm)
Valor máximo	35,444.0	10,791.0	9,752.0	10,818.0	2.0	24,487.4	3.5
Valor mínimo	25,809.0	6,985.1	1,295.9	6,909.1	1.0	16,849.1	2.5
Rango	9,635.0	3,805.9	8,456.1	3,908.9	1.0	7,638.3	1.0
Promedio	30,513.4	9,006.7	3,980.7	9,006.2	1.6	20,665.5	3,980.7
Desviación estándar	3,253.6	1,020.0	2,581.5	1,035.2	0.3	2,145.2	0.3
CV (%)	10.7%	11.3%	64.9%	11.5%	20.1%	10.4%	0.0%

4.9.1 Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal

Para el cálculo de la tensión de trabajo asociada a cada una de las deformaciones consideradas, se calculó un área neta aplastada según:

$$A_n = \text{ancho de placa metálica} * \text{ancho de probeta} = 90 * 41 = 3600 \text{ mm}^2 \quad (4.7)$$

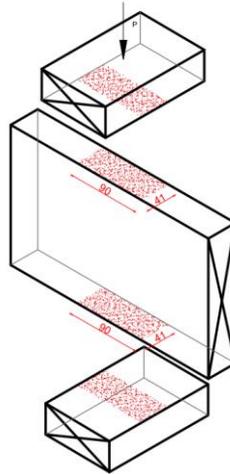


Figura 4. 5: Representación de área cargada para ensayos según esquema A cargado en el centro.

A continuación, se proporcionan tablas resumen que contienen los resultados del análisis de estadística descriptiva de las resistencias a compresión normal obtenidos a través del ensayo. Asimismo, se incluyen los de resistencia asociados a un límite de tolerancia del 5%, según lo establecido en la normativa NCh 3028-2 (Anexo 4.2). Además, se presentan valores de resistencia calculados mediante la aplicación del factor de ajuste definido en la NCh 3028-2 (Anexo 4.3). Estos últimos se consideran sólo de referencia, ya que como estos tipos de ensayos no se encuentran en la normativa, no es válido denominarlos como admisibles.

Tabla 4. 21: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo esquema A cargado en el centro probetas 2"x6".

	Rcn (MPa)		
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
Valor máximo	2.6	2.9	6.5
Valor mínimo	0.4	1.9	4.6
Rango	2.3	1.0	2.0
Promedio	1.1	2.4	5.6
Desviación estándar	0.7	0.3	0.6
CV (%)	64.6%	11.3%	10.2%

Tabla 4. 22: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo esquema A cargado en el centro probetas 2"x6".

Rcn, límites de tolerancia del 5% (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	-0.2	1.9	4.5
ES	0.2	0.1	0.2
LTNP 5%	0.4	1.9	4.6
EPN 5%	0.4	1.9	4.7

Rcn, valores admisibles referenciales (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	-0.3	1.1	2.6
LTNP 5%	0.2	1.1	2.7
EPN 5%	0.2	1.2	2.8

Se destaca la invalidez del valor de resistencia a 1mm obtenido mediante el LTP, debido a que, con las expresiones utilizadas para el cálculo, presentes en la normativa, junto al bajo valor de resistencia obtenido en este ensayo a 1mm de deformación y alta desviación de este, se obtiene un valor negativo, lo cual no es correcto.

4.10 Ensayo según esquema A cargado en el centro con probetas 2"x8"

A continuación, se presenta en forma de resumen, los datos extraídos de los ensayos según la metodología mencionada en el capítulo anterior para los ensayos según el esquema A cargado en el centro utilizando probetas de 2"x8":

Tabla 4. 23: Tabla estadística descriptiva de datos curva carga-deformación ensayos esquema A cargado en el centro probetas 2"x8".

	Fuerza máxima (N)	Rigidez (N/mm)	1mm	1 mm Offset		2.5 mm Offset	
			Fuerza (N)	Fuerza (N)	Deformación (mm)	Fuerza(N)	Deformación (mm)
Valor máximo	38,020.0	10,593.0	6,118.2	10,609.0	1.9	24,579.4	3.4
Valor mínimo	23,940.9	6,414.3	1,269.7	6,431.0	1.4	15,108.1	2.9
Rango	14,080.1	4,178.7	4,848.5	4,178.0	0.5	9,471.3	0.5
Promedio	30,871.8	8,453.5	2,548.7	8,469.4	1.7	19,669.2	3.2
Desviación estándar	3,755.4	1,243.6	980.4	1,249.8	0.1	2,717.2	0.1
CV (%)	12.2%	14.7%	38.5%	14.8%	6.1%	13.8%	3.2%

4.10.1 Estadística descriptiva de resistencia a compresión normal

Para el cálculo de la tensión de trabajo asociada a cada una de las deformaciones consideradas, se calculó un área neta aplastada según:

$$A_n = \text{ancho de placa metálica} * \text{ancho de probeta} = 90 * 41 = 3600 \text{ mm}^2 \quad (4.8)$$

A continuación, se proporcionan tablas resumen que contienen los resultados del análisis de estadística descriptiva de las resistencias a compresión normal obtenidos a través del ensayo. Asimismo, se incluyen los de resistencia asociados a un límite de tolerancia del 5%, según lo establecido en la normativa NCh 3028-2 (Anexo 4.2). Además, se presentan valores de resistencia calculados mediante la aplicación del factor de ajuste definido en la NCh 3028-2 (Anexo 4.3). Estos últimos se consideran sólo de referencia, ya que como estos tipos de ensayos no se encuentran en la normativa, no es válido denominarlos como admisibles.

Tabla 4. 24: Tabla estadística descriptiva de Rcn ensayo esquema A cargado en el centro con probetas 2"x8".

Rcn (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
Valor máximo	1.6	2.8	6.6
Valor mínimo	0.3	1.7	4.1
Rango	1.3	1.1	2.5
Promedio	0.7	2.3	5.3
Desviación estándar	0.3	0.3	0.7
CV (%)	38.2%	14.6%	13.7%

Tabla 4. 25: Tabla límites de tolerancia del 5% y valores admisibles de Rcn ensayo esquema A cargado en el centro con probetas 2"x8".

Rcn, límites de tolerancia del 5% (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	0.2	1.7	3.9
ES	0.1	0.1	0.2
LTNP 5%	0.3	2.5	5.8
EPN 5%	0.4	2.5	5.6

Rcn, valores admisibles referenciales (MPa)			
	1mm	1mm offset	2.5mm offset
LTP 5%	0.1	0.9	2.2
LTNP 5%	0.2	1.5	3.4
EPN 5%	0.2	1.5	3.4

4.11 Comparación de resistencia a compresión normal

A continuación, se presenta un gráfico de carga-deformación que muestra las curvas promedio de los ensayos realizados, el cual se realizó para obtener una comparación inicial de los resultados de resistencia a compresión normal. Este análisis se basó en el estudio de Basta *et al* (2011), donde se menciona que los ensayos que representan la interacción madera-madera exhiben una deformación inicial más significativa. Esto implica que estos ensayos se deforman más con una carga aplicada menor, lo cual se observó al comparar la deformación a 1 mm.

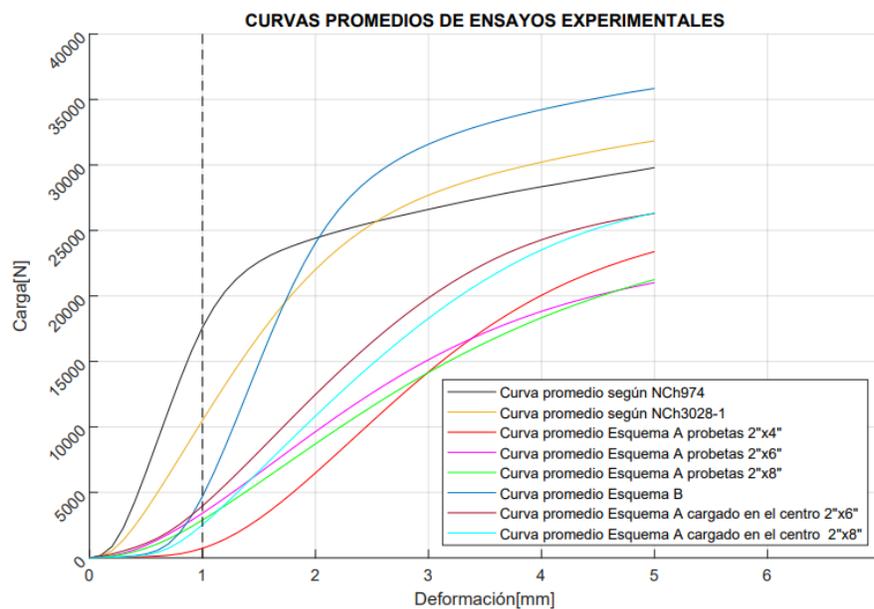


Figura 4. 2: Gráfico comparación de curvas promedio carga-deformación entre ensayos.

Es por esto que la resistencia a compresión normal a esta deformación determinada con el ensayo según la norma NCh 974 (interacción metal-madera), es mayor a la obtenida con los ensayos propuestos. El gráfico a continuación compara las curvas de tensión-deformación, teniendo en cuenta las áreas netas cargadas mencionadas anteriormente, el cual revela esta diferencia entre resistencias a compresión normal (R_{cn}):

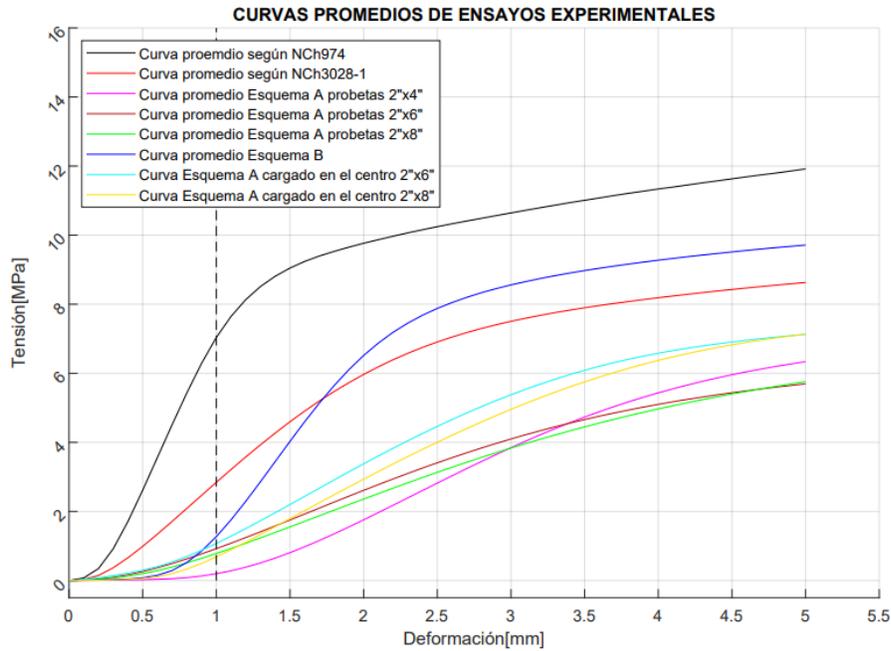


Figura 4. 3: Gráfico comparación de curvas tensión-deformación promedio entre ensayos.

Las relaciones de las resistencias a compresión normal (R_{cn}) del resto de los ensayos, con respecto, a la resistencia obtenida con el ensayo normado presente en la NCh 974, el cual coincide con el establecido en la normativa norteamericana ASTM D143-83 para determinar la resistencia a compresión normal a la fibra, fueron significativamente menores, como se aprecia a continuación:

Tabla 4. 26: Relación de R_{cn} promedio a 1mm de deformación entre ensayos.

R _{cn} promedios a 1mm		
Tipo de Ensayo	R _{cn} (MPa)	Relación
NCh 974	7.0	1.00
NCh 3028	2.8	0.40
Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x4"	0.2	0.03
Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x6"	1.0	0.14
Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x8"	0.8	0.11
Esquema B Basta <i>et al</i> (2011)	1.3	0.18

Además, es notable que esta discrepancia en las relaciones se incrementa al comparar las resistencias a compresión normal en el límite de tolerancia del 5%, calculado mediante un enfoque paramétrico de los datos:

Tabla 4. 27: Relación de R_{cn} con límite de tolerancia del 5% a 1mm de deformación entre ensayos.

Tipo de Ensayo	R_{cn} (MPa)	Relación
NCh 974	4.4	1.00
NCh 3028	1.3	0.30
Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x4"	-0.04	-0.01
Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x6"	0.4	0.10
Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x8"	0.1	0.04
Esquema B Basta <i>et al</i> (2011)	0.1	0.03

A continuación, se presenta una comparación gráfica de las curvas promedio de tensión-deformación de los ensayos, sin tener en cuenta el acomodo inicial que experimentaron los ensayos. En este análisis, se despreció la deformación obtenida en la intersección de la recta de regresión del rango elástico con la recta de carga igual a 0 N. Por lo tanto, las curvas comienzan en su rango elástico lineal, desde carga y deformación igual a 0, y las deformaciones "offset" coinciden con los ejes del gráfico:

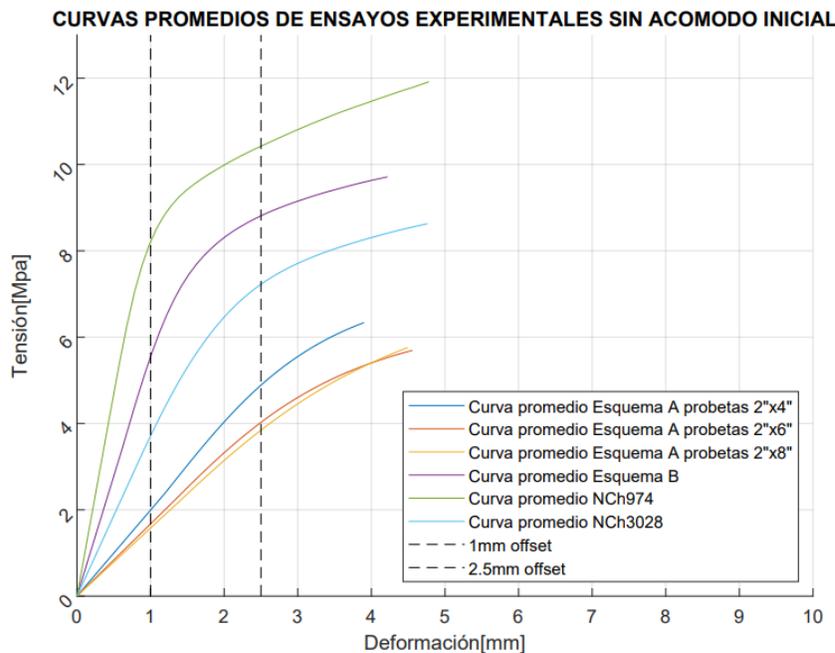


Figura 4. 4: Gráfico comparación de curvas tensión-deformación promedio sin acomodo inicial entre ensayos.

Tabla 4. 28: Relación de R_{cn} promedio a 1mm y 2.5mm de deformación "offset" entre ensayos.

Tipo de Ensayo	R_{cn} promedios a 1mm <i>Offset</i>		R_{cn} promedios a 2.5mm <i>Offset</i>	
	R_{cn} (MPa)	Relación	R_{cn} (MPa)	Relación
NCh 974	8.2	1.00	10.4	1.00
NCh 3028	3.7	0.45	7.1	0.68

Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x4"	2.1	0.26	5.0	0.49
Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x6"	1.7	0.21	4.1	0.39
Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x8"	1.6	0.20	3.9	0.38
Esquema B Basta <i>et al</i> (2011)	5.7	0.69	8.8	0.84

Del análisis comparativo realizado, se observó que, aunque la relación entre los ensayos de interacción madera-madera y el ensayo realizado según la NCh 974 siguió siendo menor, esta brecha disminuyó al considerar el uso de los valores de deformación *offset* de 1 mm y 2,5 mm para la comparación. Al despreciar el acomodo inicial que experimentaron los ensayos, se obtuvo una mejor aproximación entre los resultados. Es importante destacar que el ensayo que mostró una mayor similitud en términos de comparación bajo estos criterios es el ensayo realizado según el Esquema B de Basta *et al* (2011). Esto puede atribuirse a la diferencia en la forma en que la carga se transmitió desde la máquina de ensayos a la probeta en ese esquema en particular. En el Esquema B, la probeta que transmitió la carga se encontraba orientada paralelamente a su fibra, lo que se asemeja más al comportamiento de la placa de metal en el ensayo según la NCh 974. A diferencia de los ensayos realizados según el Esquema A (viga entre soleras de un muro), donde todos los elementos se orientaron perpendicularmente a su fibra, lo que provocó un mayor aplastamiento con una carga aplicada menor. Además, se apreció en estos ensayos, que la resistencia obtenida en ambas deformaciones *offset* disminuyó según aumentaron las dimensiones de la probeta ensayada.

En la tabla 4.29, se presenta la relación de resistencias a compresión normal obtenidas a las deformaciones *offset* entre los ensayos realizados, asociadas al límite de tolerancia del 5% de los datos, según un enfoque paramétrico. Los resultados entregaron que no existen diferencias significativas en la relación obtenida utilizando el límite de tolerancia del 5% en comparación con los datos promedio previamente encontrados.

Tabla 4. 29: Relación de R_{cn}, límite de tolerancia 5% a 1mm y 2.5mm de deformación "offset" entre ensayos.

Tipo de Ensayo	R _{cn} LTP 5% a 1mm <i>Offset</i>		R _{cn} LTP 5% a 2.5mm <i>Offset</i>	
	R _{cn} (MPa)	Relación	R _{cn} (MPa)	Relación
NCh 974	5.4	1.00	6.4	1.00
NCh 3028	2.1	0.39	4.4	0.69
Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x4"	1.3	0.24	3.3	0.51
Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x6"	1.1	0.20	2.9	0.44

Esquema A Basta <i>et al</i> (2011) 2"x8"	0.9	0.17	2.4	0.37
Esquema B Basta <i>et al</i> (2011)	3.6	0.67	5.7	0.88

4.12 Comparación de rigidez elástica lineal

A continuación, se muestra una tabla comparativa de las rigideces elásticas lineales promedio entre los ensayos, calculadas según lo descrito en el punto 3.7 de este estudio. Además, se presenta un gráfico que muestra las curvas carga-deformación promedio de los ensayos, resaltando el rango lineal utilizado para registrar la rigidez.

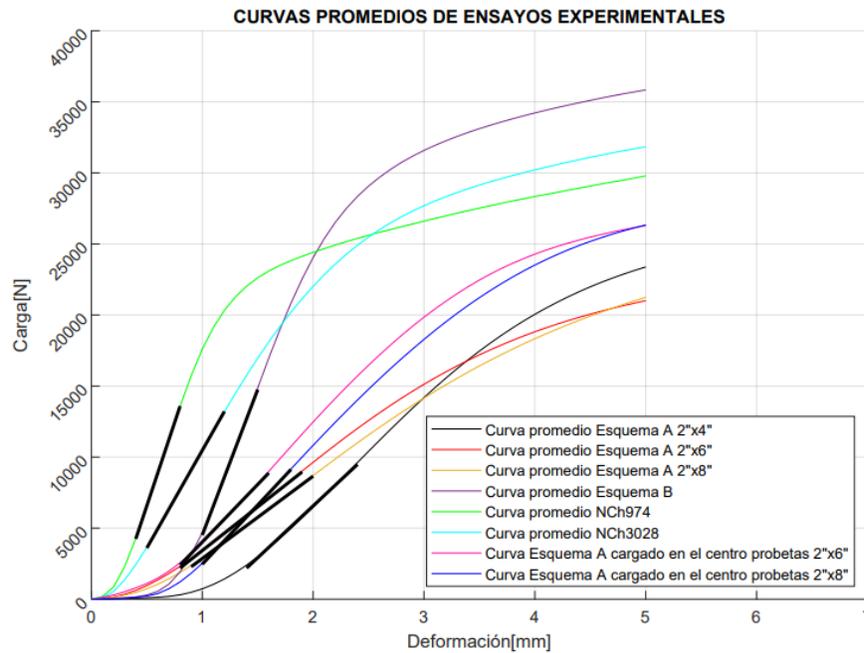


Figura 4. 5: Gráfico comparación de curvas carga-deformación promedio con regresión en rango elástico.

Tabla 4. 30: Relación en porcentaje entre rigideces observadas en los ensayos.

Esquema	Rigidez promedio (N/mm)	(%)	
NCh 974	23524.4	100.00	
NCh 3028-1	14817.7	62.99	
Basta <i>et al</i> (2011) Esquema A	Probetas 2"x4"	8049.6	34.22
	Probetas 2"x6"	6389.3	27.16
	Probetas 2"x8"	6005.6	25.53
Basta <i>et al</i> (2011) Esquema B	21142.9	89.88	
Esquema A cargado en el centro	Probetas 2"x6"	9006.67	38.29
	Probetas 2"x8"	8453.48	35.93

De la tabla anterior, se pudo determinar que la rigidez de los ensayos de interacción madera-madera, es considerablemente menor a la rigidez que presenta el ensayo realizado según la NCh 974. Esta diferencia en la rigidez se explica en parte por la cantidad de elementos que interactúan en los ensayos de vigas (Esquemas A), ya que, en estos ensayos, varias áreas netas se cargan y deforman de manera independiente. Asimismo, se visualizó de los resultados de rigidez de estos últimos, que la rigidez de las probetas disminuyó según aumentaron sus dimensiones de altura.

También se notó una diferencia considerable en cuanto a la rigidez con el ensayo según la NCh 3028-1, aunque en este último caso, la probeta cargada fue de mayores dimensiones, con dos áreas netas cargadas que se deformaron. El esquema de ensayo que mostró una rigidez más cercana a la del ensayo NCh 974 fue el ensayo según el Esquema B de Basta *et al* (2011). Esta leve diferencia de rigidez se debe a que, aunque una de las piezas del esquema estaba orientada en su dirección paralela a la fibra, su resistencia a la deformación es menor que la de una pieza de metal, como en el ensayo NCh 974. Además, esta diferencia también se debe a que la probeta que soporta la carga estaba cargada en su borde. La diferencia de rigidez entre cargar un elemento estructural en su centro o en su borde se pudo apreciar claramente al comparar los ensayos realizados según el Esquema A de Basta *et al* (2011) con los ensayos propuestos, denominados Esquema A cargado en el centro, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. 31: Relación en porcentaje entre rigideces observadas en los ensayos Esquema A y Esquema A cargado en el centro.

Esquema		Rigidez promedio (N/mm)	(%)
Esquema A cargado en el centro	Probetas 2"x6"	9006.7	100.00
Basta <i>et al</i> (2011) Esquema A		6389.3	70.94
Esquema A cargado en el centro	Probetas 2"x8"	8453.5	100.00
Basta <i>et al</i> (2011) Esquema A		6005.6	71.04

Según los datos presentados en la tabla anterior, se evidenció que los elementos ensayados según el Esquema A, donde la carga fue aplicada en el borde, experimentaron una reducción de aproximadamente el 30% de su rigidez en comparación con los elementos cargados en su centro. Esta disminución se atribuye a la contribución de resistencia y soporte del material no sometido a carga, al volumen directamente debajo del área cargada. También, en el caso de los elementos cargados en el centro, la distribución de carga fue más uniforme y, por lo tanto, se obtuvo una mayor rigidez en comparación con los elementos cargados en el borde. Asimismo, con el propósito de

realizar una comparación general entre los resultados obtenidos en cuanto a resistencia a compresión normal y rigidez, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) entre los diferentes ensayos, seguido del Método de Tukey, los cuales fueron detallados en el capítulo anterior. Este análisis estadístico permitió evaluar la existencia de diferencias significativas entre los distintos ensayos. Los resultados revelaron que no se encontraron diferencias significativas en las medias de rigidez elástica ni en la resistencia registrada a una deformación real de 1mm y en las deformaciones *offset* para los ensayos realizados según el Esquema A de Basta *et al* (2011) en las probetas de 2"x6" y 2"x8". Estos hallazgos también se observaron en los ensayos realizados conforme al Esquema A cargado en el centro para las mismas dimensiones de probetas.

4.12.1 Resultados obtenidos en ensayos cíclicos

Como se detalló en el capítulo anterior, se realizó el registro de rigidez del material en cada ciclo de carga en los ensayos cíclicos, donde se pudo observar una disminución progresiva de la rigidez a medida que los ciclos avanzaron. Esta disminución se atribuye al hecho de que, en los primeros ciclos de carga, donde se alcanzaron deformaciones de 1.5, 2, 3.5 y 5 mm, se ingresó al rango de plástico del material, lo que resultó en un aumento del aplastamiento residual. La Figura siguiente ilustra claramente esta tendencia.

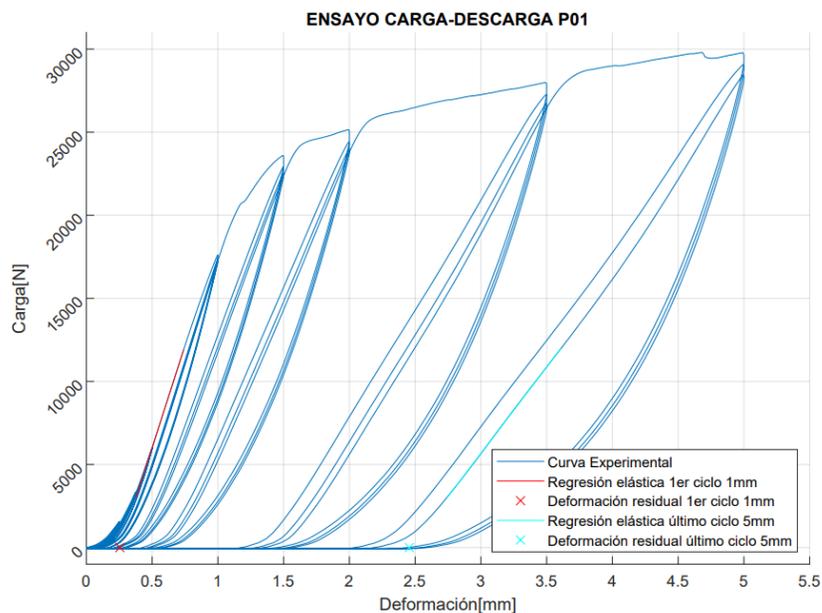


Figura 4. 6: Gráfico carga-deformación de ensayo de carga cíclico.

En la tabla 4.32, se presenta la diferencia de rigidez observada entre el primer ciclo de carga hasta 1 mm de deformación y el último ciclo de carga hasta 5 mm de deformación, con ello, se estimó que a medida que los ciclos progresaron, la rigidez del material disminuyó aproximadamente en un 50%, mientras que el aplastamiento remanente del material aumentó en aproximadamente 2,5 mm. Esta tendencia refleja el efecto acumulativo de los ciclos de carga en la respuesta mecánica del material.

Tabla 4. 32: Relación en porcentaje entre rigideces y deformación remanente observadas en ensayos cíclicos.

Ciclo	Rigidez promedio (N/mm)	%	Deformación residual promedio [mm]
1ero a 1mm	26209.3	100.0%	0.2
Último a 5mm	13314.2	51.0%	2.6

También se realizó una comparación de las rigideces medias registradas en los ciclos de carga hasta 1mm de deformación, mediante el análisis de varianza (ANOVA) y el uso del Método de Tukey, con lo que se determinó que no existe una diferencia significativa en la rigidez elástica de estos ciclos de carga. Esto se debe a que el material no llegaba a entrar en su rango elástico, y, por lo tanto, no se observaron variaciones significativas en la respuesta mecánica en términos de rigidez, de manera que, la rigidez elástica observada en el primer ciclo de carga hasta 1.5 mm de deformación, no presentó una diferencia significativa con la obtenida en los ciclos de carga hasta 1 mm. A partir del segundo ciclo de carga hasta 1,5 mm, se pudo apreciar una disminución en la rigidez del material, debido a que en el ciclo de carga anterior se ingresó al rango de plástico del material. Esta disminución de rigidez elástica se apreció en el segundo ciclo de carga asociada a cada deformación, como se aprecia en la tabla siguiente:

Tabla 4. 33: Relación entre rigideces observadas en los ciclos de carga en ensayos cíclicos.

Deformación	N° de Ciclo	Rigidez promedio (N/mm)	Relación
hasta 1mm	1	26209.3	1.00
	2	25624.9	0.98
	3	25438.4	0.97
hasta 1.5mm	1	25418.6	0.97
	2	22194.5	0.85
	3	21931.3	0.84
hasta 2mm	1	21904.4	0.84
	2	19158.2	0.73
	3	19077.6	0.73
hasta 3.5mm	1	19073.1	0.73
	2	14301.5	0.55
	3	14264.8	0.54

4.13 Comparación de deformaciones

Además, se llevó a cabo una comparación de la deformación experimentada por todos los ensayos en relación a la carga registrada en el ensayo realizado según la norma chilena NCh 974 a 1 mm de deformación. Este valor de carga se consideró como admisible debido a varios factores. En primer lugar, este ensayo se encuentra estipulado en la normativa chilena y este coincide con el realizado en la norma ASTM D143-84 para la determinación de resistencia perpendicular a la fibra. Asimismo, el valor admisible obtenido en este estudio para la deformación a 1 mm, con límite de tolerancia del 5% (LTP), es el que guarda mayor similitud con los valores actualmente presentes en la normativa de diseño NCh 1198:2014 y también coinciden con los resultados obtenidos en el estudio realizado por Wagner, M. (s.f.). Resulta relevante que los resultados de esta comparación se obtuvieron utilizando las curvas promedio de los ensayos, por lo que puede haber ligeras variaciones en los resultados debido a la aproximación realizada al obtener estas curvas. En la figura 4.12, se ilustra esta comparación de forma visual.

En la tabla 4.34, se presenta la deformación correspondiente a cada ensayo para la carga admisible obtenida según el ensayo realizado conforme a la norma NCh 974 para una deformación de 1 mm. Se muestran tanto para las curvas promedio como para las curvas asociadas al percentil 5% de los datos, las cuales se obtuvieron mediante la resta de dos desviaciones estándar a la curva promedio.

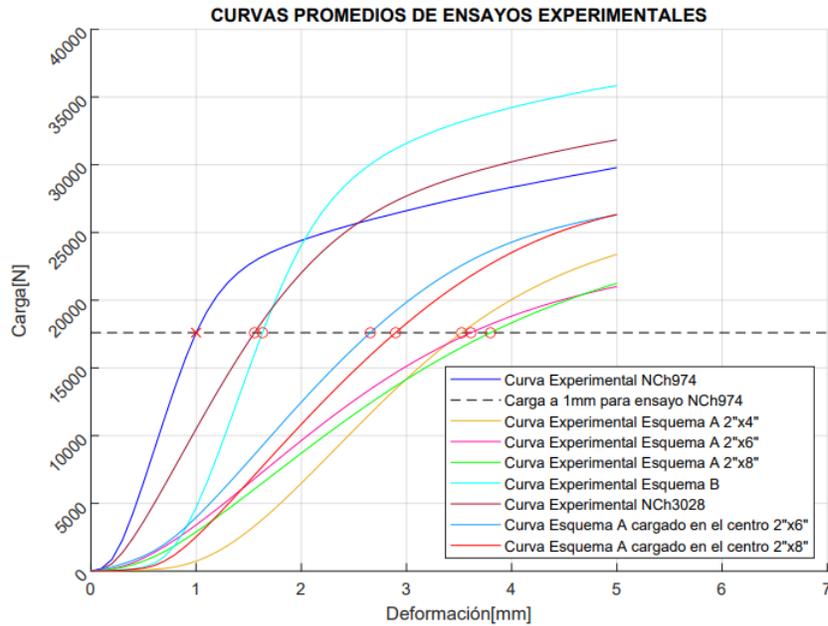


Figura 4. 7: Gráfico comparativo de deformación entre curvas promedios de los ensayos.

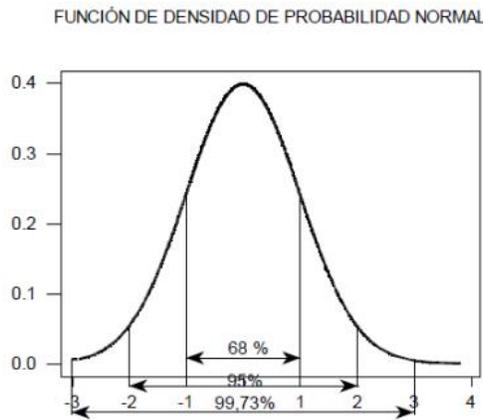


Figura 4. 8: Función de densidad de Probabilidad Normal.

Fuente: Álvarez Borrego, J. (2012).

Tabla 4. 34: Comparación de deformaciones observadas en los ensayos con respecto a carga admisible.

Tipo de Ensayo	CURVAS PROMEDIOS		CURVAS PERCENTIL 5%	
	Carga (N)	Deformación (mm)	Carga (N)	Deformación (mm)
NCh974	17598.2	1.0	10847.6	1.0
NCh3028	17598.2	1.6	10847.6	1.8
Esquema A 2"x4"	17598.2	3.5	10847.6	3.7
Esquema A 2"x6"	17598.2	3.6	10847.6	3.2
Esquema A 2"x8"	17598.2	3.8	10847.6	3.8
Esquema B	17598.2	1.6	10847.6	1.8
Esquema A cargado en el centro 2"x6"	17598.2	2.7	10847.6	2.5
Esquema A cargado en el centro 2"x8"	17598.2	2.9	10847.6	2.7

Estos resultados complementaron los anteriores hallazgos sobre la resistencia a la compresión normal a la fibra y la rigidez observada en los ensayos, y demuestran las claras diferencias que existen entre las distintas interacciones representadas mediante los esquemas de ensayo. Paralelamente, se compararon las deformaciones obtenidas con los factores de ajuste presentes en la normativa norteamericana NDS C4.6.3 considerando cada tipo de interacción o condición de apoyo, los cuales fueron considerablemente similares como se presenta a continuación:

Tabla 4. 35: Comparación de deformaciones de ensayos y factores de ajuste de la NDS.

Condición de apoyo	Factor de ajuste para deformación según la NDS	Tipo de Ensayo	Deformación promedio (mm)
1. Madera – Madera (ambas perpendicular a la fibra)	2.50	Esquema A cargado en el centro	2.57
2. Madera – Madera (una paralela a la fibra y una perpendicular a la fibra)	1.75	Esquema B	1.85
3. Metal – Madera (madera cargada perpendicular a su fibra)	1.00	NCh 974	1.00

Para la deformación promedio obtenida para la condición de apoyo 1 de la tabla anterior, se consideró realizar un promedio entre las deformaciones asociadas a las curvas del percentil 5% de los ensayos realizados según el Esquema A cargado en el centro, en los cuales todos los elementos se encontraban orientados perpendicular a su fibra y cargados en su centro. A su vez, para la condición de apoyo 2 de la tabla anterior, se utilizó la deformación obtenida en la curva asociada al percentil 5% del ensayo realizado según el Esquema B de Basta *et al* (2011). Si bien, los resultados se diferencian levemente de los factores de ajuste, esto se explica, en parte, por la cantidad de elementos en interacción en los ensayos realizados según el Esquema A cargado en el centro, ya que los factores de ajuste de la NDS son considerados sólo para la interacción de 2 elementos. Con respecto a la condición de apoyo 2, como se mencionó anteriormente en el ensayo realizado según el Esquema B, el elemento soportante fue cargado en su borde, experimentando una menor rigidez que si hubiese sido cargado en su centro. Además, se realizó una comparación entre las deformaciones obtenidas en los ensayos, y las obtenidas considerando las expresiones establecidas en la normativa de diseño NCh 1198:2014, con las cuales se puede estimar el aplastamiento en elementos de madera de Pino Radiata. Esta información se detalla en el Anexo 4.3.2 del presente estudio.

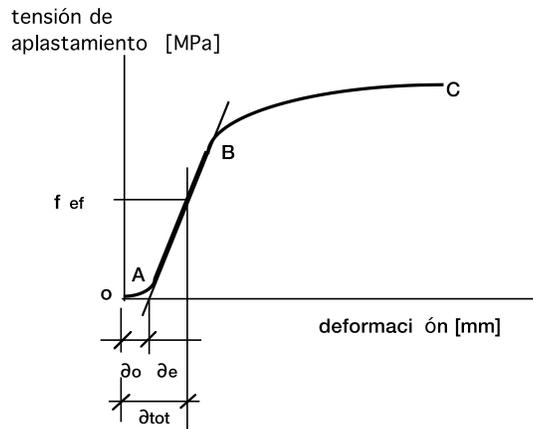


Figura 4. 9: Deformación anelástica (δ_o) y elástica (δ_e) y total (δ_{tot}) en curva tensión-deformación.
Fuente: Wagner, M. (s.f.).

Para cada ensayo, se calculó el índice de aplastamiento perpendicular a la fibra por unidad de altura de escuadría. Este cálculo se realizó promediando los índices obtenidos dentro del rango elástico de cada curva carga-deformación, comprendido entre el 10% y el 40% de la carga máxima del ensayo. Estos índices se determinaron utilizando la siguiente ecuación, descrita en el estudio de Wagner, M. (s.f.):

$$E_{cn,h} = \frac{P}{z * a * \delta} \tag{4. 9}$$

Siendo:

P = carga aplicada, en N;

δ = deflexión relativa, en mm;

z, a = largo y ancho de la superficie aplastada, en mm.

A continuación, se exponen los datos obtenidos correspondientes al índice de aplastamiento asociado a cada tipo de ensayo realizado:

Tabla 4. 36: Datos asociados al análisis descriptivo del índice de aplastamiento de cada ensayo.

Tipo de Ensayo	NCh 3028-1	NCh 974	Esquema A Basta et al (2011)			Esquema A cargado en el centro		Esquema B Basta et al (2011)	
			Probetas 2"x4"	Probetas 2"x6"	Probetas 2"x8"	Probetas 2"x6"	Probetas 2"x8"		
Ecn,h (MPa/mm)	Promedio	3.8	9.4	2.2	1.7	1.6	2.4	2.3	5.7
	Desviación Estándar	0.9	1.8	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	1.2
	CV(%)	23.4%	18.6%	20.4%	19.8%	22.2%	11.3%	14.7%	20.5%
	Percentil 5% (LTP)	2.1	6.1	1.3	1.1	0.9	1.8	1.6	3.5

Utilizando los valores promedio tanto del índice de aplastamiento como de la tensión efectiva a 1 mm de deformación asociada a cada ensayo, se estimaron los valores de aplastamiento para madera seca presentes en la tabla 4.37.

Tabla 4. 37: Comparación de aplastamiento estimado entre ensayos.

Tipo de Ensayo	Ecn,h promedio (MPa/mm)	Fap 1mm promedio (MPa)	δ elástica (mm)	δ efectiva o total (mm)
NCh974	9.4	7.0	0.7	1.1
NCh3028	3.8	2.8	0.7	1.1
Esquema A 2"x4"	2.2	0.2	0.1	0.5
Esquema A 2"x6"	1.7	1.0	0.6	1.0
Esquema A 2"x8"	1.6	0.8	0.5	0.9
Esquema B	5.7	1.3	0.2	0.6
Esquema A cargado en el centro 2"x6"	2.4	1.1	0.4	0.8
Esquema A cargado en el centro 2"x8"	2.3	0.7	0.3	0.7

Esta comparación permitió evaluar la concordancia entre las deformaciones registradas en los ensayos, con el aplastamiento estimado por las expresiones establecidas en la normativa vigente. De la cual, se encontró que sólo en los ensayos normados con interacción metal-madera, la expresión utilizada para estimar el aplastamiento, proporcionó resultados precisos y por el lado de la seguridad. Sin embargo, en el caso de los ensayos de interacción madera-madera, se obtuvo un aplastamiento estimado considerablemente menor al experimentado en laboratorio, donde estos últimos varían no sólo por el tipo de ensayo realizado, sino también con el tamaño de las probetas utilizadas. Estas determinaciones resaltan la necesidad de considerar cuidadosamente el tipo de interacción presente entre los elementos al estimar el aplastamiento, con el fin de obtener resultados más confiables y consistentes. Los valores estimados variaron al utilizar la expresión presente en la normativa para el aplastamiento inherente al percentil del 95% en madera seca, debido a que tal expresión, considera una deformación anelástica igual a 0.8 mm, por lo cual, se obtuvieron resultados aún más conservadores en los ensayos normados con interacción metal-madera. Sin embargo, en los ensayos de interacción madera-madera, se observaron resultados más precisos y por el lado de la seguridad, a excepción del aplastamiento estimado en el ensayo realizado según el Esquema A de Basta *et al* (2011) para probetas de 2"x4".

Tabla 4. 38: Comparación de aplastamiento estimado inherente al percentil 95% entre ensayos.

Tipo de Ensayo	Ecn,h promedio [MPa/mm]	Fap 1mm promedio [MPa]	δ elástica [mm]	δ efectiva o total [mm]
NCh974	9.4	7.0	0.7	1.5
NCh3028	3.8	2.8	0.7	1.5
Esquema A 2"x4"	2.2	0.2	0.1	0.9
Esquema A 2"x6"	1.7	1.0	0.6	1.4
Esquema A 2"x8"	1.6	0.8	0.5	1.3
Esquema B	5.7	1.3	0.2	1.0
Esquema A cargado en el centro 2"x6"	2.4	1.1	0.4	1.2
Esquema A cargado en el centro 2"x8"	2.3	0.7	0.3	1.1

Estas diferencias entre los resultados obtenidos se explican debido a la deformación anelástica o de acomodo (δ_o) que experimentaron los ensayos de interacción madera-madera, que si bien no son iguales a las consideradas en las expresiones para el cálculo del aplastamiento presente en la NCh1198:2014, son significativamente diferentes con los ensayos de interacción metal-madera, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4. 39: Deformación anelástica promedio experimentada por ensayos de laboratorio.

Tipo de Ensayo	Deformación anelástica promedio (δ_o)
NCh974	0.2
NCh3028	0.2
Esquema A 2"x4"	1.2
Esquema A 2"x6"	0.5
Esquema A 2"x8"	0.6
Esquema B	0.8
Esquema A cargado en el centro 2"x6"	0.6
Esquema A cargado en el centro 2"x8"	0.7

4.14 Conclusiones

En este capítulo, se presentaron los resultados obtenidos a través de los ensayos de laboratorio realizados, destacando las diferencias significativas observadas en la resistencia a compresión normal, rigidez y deformaciones entre los ensayos y las normativas chilena y norteamericana. Se propusieron relaciones entre los resultados obtenidos según los tipos de interacciones representadas en los ensayos. El análisis de los resultados y su discusión visto en este capítulo permitirá respaldar conclusiones fundamentadas y respaldadas científicamente, como también, líneas futuras de investigación.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se presentó la realización y el correspondiente análisis de resultados de ensayos de laboratorio los cuales se consideraron como los que representan de mejor manera la interacción de elementos de madera en aplicaciones estructurales típicas, bajo compresión perpendicular a su fibra. Con ellos, se representaron las distintas condiciones de apoyo de los elementos presentes en la construcción, sea esta metal-madera, representada mediante la realización de los ensayos vigentes en la normativa chilena para la determinación de la resistencia a compresión normal a la fibra, como madera-madera, mediante la consideración de ensayos obtenidos de literatura científica como ensayos propuestos.

Se realizaron comparaciones de la resistencia a compresión perpendicular a la fibra obtenida con los ensayos realizados a distintas deformaciones. Los resultados obtenidos han revelado diferencias significativas en la resistencia a la compresión normal entre los ensayos de interacción madera-madera y el ensayo normado presente en la NCh 974, independientemente de la deformación considerada. Asimismo, a modo de complementar los resultados de resistencia, se demostró una menor rigidez elástica en los ensayos de interacción madera-madera en comparación con los ensayos normados.

Esto llevó a la conclusión de que el ensayo vigente en la normativa, el cual concuerda con el vigente en la normativa norteamericana, no es representativo ni preciso para todas las condiciones de apoyo comunes construcción. Además, se pudo concluir que los ensayos realizados que representan la condición de apoyo madera-madera, no son los más adecuados para determinar una resistencia a compresión normal, debido a la compleja interacción de múltiples elementos que se deforman en conjunto, haciendo que la tensión calculada, no sea representativa con la deformación que experimenta el sistema.

Los valores de rigidez obtenidos en los ensayos de interacción madera-madera, pueden proporcionar a los profesionales a cargo del diseño de estructuras, una base para estimar de la rigidez esperada

más desfavorable en aplicaciones estructurales típicas, ya que, en una construcción real se experimenta la contribución a la rigidez de más elementos estructurales, como es el caso del Esquema A de Basta *et al* (2011), que representa parte del entramado de entrepiso, pero en una construcción real, se complementa el sistema ensayado con vigas principales, cadenas de entrepiso y contrachapado estructural que arriostra la plataforma.

Por otra parte, de los ensayos de carga cíclica realizados, se pudo concluir que utilizando el ensayo establecido en la normativa chilena NCh 974, el considerar una deformación de 1mm, para la determinación del valor admisible de resistencia a compresión perpendicular a la fibra es óptima, ya que se impide llevar al material a su rango plástico, y la disminución de la rigidez del elemento, lo cual se integra con el valor de resistencia a compresión perpendicular la fibra obtenida mediante el ensayo realizado según lo establecido en la NCh 974, considerando 1mm de deformación, dado que se asemeja al valor admisible establecido actualmente en la normativa.

A través de comparaciones analíticas con respecto a la deformación experimentada por los ensayos considerando una carga admisible, se pudo evaluar el desempeño de los ensayos en relación con los estándares establecidos en la normativa norteamericana, para cada tipo de condición de apoyo. De esto se pudo concluir que los criterios utilizados para realizar esta comparación, fueron similares a los posiblemente utilizados para determinar los factores de ajuste a la deformación de la NDS. Esto, al igual que la comparación de rigidez, puede proporcionar a los profesionales a cargo del diseño de estructuras, una base para relacionar las deformaciones esperadas de acuerdo a las condiciones de apoyo analizadas.

Estos análisis son de gran aporte al conocimiento de la resistencia a compresión perpendicular a la fibra en Chile, especialmente debido a la escasa información disponible a nivel nacional e internacional. Los resultados y análisis presentados pueden servir como base para futuras investigaciones y para una posible actualización y adaptación a la realidad nacional de la normativa de diseño en madera con la cual sea posible el diseño de viviendas de mediana altura, donde la madera pueda ser utilizada de manera eficiente y correcta para la materialización de edificios.

5.2 Líneas futuras de investigación

Basado en los resultados y análisis de este estudio, se plantean dos ensayos adicionales que complementarían y contribuirían al desarrollo del conocimiento sobre la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra en distintas condiciones de apoyo presentes en la construcción. El primer ensayo propuesto representará la condición de apoyo madera-madera con ambos elementos orientados perpendicular a su fibra (Figura 5.1 (a)). Sin embargo, a diferencia de los ensayos realizados en este estudio, se limitaría la interacción a solo dos elementos, impidiendo la compleja interacción de múltiples elementos que afecta la representatividad de la tensión calculada en el ensayo. El segundo ensayo propuesto busca representar la condición de apoyo madera-madera con un elemento orientado paralelo y otro perpendicular a su fibra (Figura 5.1 (b)). Este ensayo se asemeja al Esquema B propuesto por Basta et al. (2011), pero en esta propuesta se cargaría el elemento soportante en su centro, con el objetivo de evitar la disminución de rigidez observada en este estudio.

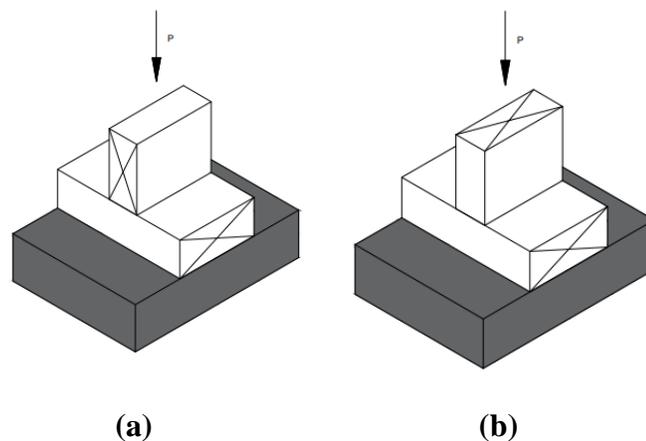


Figura 5. 1: (a) Ensayo propuesto ambos elementos orientados perpendicular a su fibra. (b) Ensayo propuesto un elemento orientado paralelo y otro perpendicular a su fibra.

Finalmente, se recomienda llevar a cabo ensayos de carga cíclica utilizando los esquemas propuestos previamente, con el fin de evaluar y analizar la disminución de rigidez esperada y el incremento de deformación aparente a medida que aumenta los ciclos de carga. Se espera que estos ensayos proporcionen información adicional sobre el comportamiento de los elementos de madera en condiciones de carga repetida, la cual podría diferir de los resultados obtenidos en este estudio. Su implementación en investigaciones futuras sería de gran valor para el avance en el diseño y construcción de estructuras de madera.

REFERENCIAS

Acuña, H., Easton, P., Ramos, C., Torres, C. (2019). **El sector de la construcción ante el desafío climático global.** Gerencia de Estudios CChC. https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Fundamenta_45.pdf

Aguilera Fernández, M., Benedetti Ruiz, S., Gallardo Lara, C., et al (2020). **Estudio percepción construcción en madera.** INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/30358>

Antonio Rustom J. (2012). **Estadística Descriptiva, Probabilidad e Inferencia. Una vision conceptual y aplicada.** Facultad de Ciencias Agronómicas – Universidad de Chile. Santiago. Chile.

ASTM (2014) **D 143-14 Standard methods of testing small clear specimens of timber.** American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, EEUU.

AWC (2014) **NDS Supplement, National Design Specification Design Value for Wood Construction, 2015 Edition.** American Wood Council. Washington DC. EEUU.

AWC (2018) **National Design Specification for Wood Construction with Commentary.** American Wood Council. Washington DC. EEUU.

Basta, C. T., Gupta, R., Leichti, R. J. y Sinha, A. (2011). **Characterizing perpendicular to-grain compression (C_L) behavior in wood construction.** *Holzforschung*, 65(6), 845-853. <https://doi.org/10.1515/hf.2011.104>

CTEC INNOVACION (6 de mayo de 2021) **Construcción en madera, desafíos y oportunidades para el sector construcción.** Corporación de Desarrollo Técnico. <https://www.cdt.cl/construccion-en-madera-desafios-y-oportunidades-para-el-sector-construccion/>

CORMA (s.f.) **Manual de Construcción de Viviendas en Madera.** Corporación Chilena de la Madera. Santiago, Chile.

Douglas S. Thompson, PE, SE, SECB (2017) **Design Example: Five-Story Wood-Frame Structure over Podium Slab**. WoodWorks. Lake Forest, CA. EEUU.

Formolo, F. and Granström, R. (2007) **Compression perpendicular to grain and reinforcement of a pre-stressed timber deck**. Master Thesis. Department of Division of Structural Engineering, Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.

García Ortega, M., Benedetti Ruiz, S. (2021). **La madera como material para la construcción: mitos, realidades y oportunidades**. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/31358>

Hassan Ali, K., Hussain, T. and Kamalt, A. (2014) **Compression perpendicular to grain in timber – Bearing strength for a sill plate**. Master Thesis in Civil Engineering. Department of building technology. Linnéuniversitetet. Kalmar-Växjö, Sweden.

INN (1986) **Madera – Determinación de las propiedades mecánicas – Ensayo de compresión perpendicular a las fibras**. NCh974.1986. Instituto Nacional de Normalización. Santiago. Chile.

INN (2014) **Madera – Construcciones en madera – Cálculo**. NCh1198:2014. Instituto Nacional de Normalización. Santiago. Chile.

INN (2017) **Madera estructural – Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia – Parte 1: Métodos de ensayo en tamaño estructural**. NCh3028/1.2017. Instituto Nacional de Normalización. Santiago. Chile.

INN (2017) **Madera estructural – Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia – Parte 2: Muestreo y evaluación de los valores característicos de piezas en tamaño estructural**. NCh3028/2.2017. Instituto Nacional de Normalización. Santiago. Chile.

Imperial (s.f.) **Herramientas de medición – Pie de metro digital 6” BT RM813**. Recuperado el 07 de abril de 2023 de <https://www.imperial.cl/herramientas-de-medici%C3%B3n/pie-de-metro-digital-6-bt-rm813/product/124047>

López, J. (02 de octubre, 2017). **Coefficiente de determinación (R cuadrado)**. <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.html>

Pérez, J. (2013). **Test HSD de Tukey**. La Matemática y la Estadística: Una Orquesta Hecha Instrumento. <https://jllopisperez.com/2013/01/28/test-hsd-de-tukey/>

Álvarez Borrego, J. (2012). **Control Estadístico de Procesos**. Repositorio Digital Instituto Politécnico Nacional. <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/5507>

Krawinkler, H., Parisi, F., Ibarra, L., Ayoub, A. y Medina, R. (2001). **Development of a Testing Protocol for Woodframe Structures**. CUREE - Caltech Woodframe Project Report W-02. Stanford Digital Repository. <http://purl.stanford.edu/bf933wk8343>

ProdTech (s.f.) **Medidores de humedad de madera (de contacto)**. Recuperado el 07 de abril de 2023 de <http://www.prodtech.cl/products.html>

TIBC (s.f.). **¿Qué es el análisis de la varianza (ANOVA)?** Recuperado el 07 de junio de 2023 de <https://www.tibco.com/es/reference-center/what-is-analysis-of-variance-anova>

Wagner, M. (s.f.) **Ensayos de compresión perpendicular a la dirección de la fibra. CI 5224 Diseño y construcción en madera**. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

ZwickRoell (s.f.) **Maquina de ensayos universal ProLine**. Recuperado el 07 de abril de 2023 de <https://www.zwickroell.com/es/productos/maquinas-de-ensayos-de-materiales-estaticas/maquinas-de-ensayos-universales-para-aplicaciones-estaticas/proline/#c69339>

ANEXOS

ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10: Reducción de las desigualdades.
- ODS-11: Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12: Producción y consumo responsables.
- ODS-13: Acción por el clima.
- ODS-14: Vida Submarina.
- ODS-15: Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16: Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17: Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación

Una posible actualización y adaptación a la realidad nacional de la normativa chilena de diseño en madera, específicamente en relación a la resistencia a compresión normal a su fibra, con el objetivo de permitir el diseño de viviendas de mediana altura y promover un uso eficiente y adecuado de la madera en la construcción, podría contribuir a diferentes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura: La actualización y especificación de la normativa chilena para el diseño en madera promovería el uso de este material en la industria de la construcción, fomentando la innovación en técnicas de diseño y construcciones sostenibles.

ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles: La actualización y especificación de la normativa chilena para el diseño en madera, con la cual sea posible el diseño de viviendas de mediana altura, contribuiría a la creación de comunidades más sostenibles. La madera es un recurso renovable con un menor impacto ambiental, lo que reduciría la huella ecológica de las construcciones y promovería un entorno urbano más sostenible.

ODS 12: Producción y Consumo Responsables: La actualización de la normativa promovería el uso responsable de la madera como alternativa a otros materiales de construcción más contaminantes. Al optar por la madera, se reduciría la demanda de recursos no renovables y se promovería una producción y consumo más responsables, fomentando así prácticas sostenibles en el sector de la construcción.

ODS 13: Acción por el Clima: La madera es un material natural renovable que tiene la capacidad de capturar y almacenar carbono durante su ciclo de vida, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático. Al fomentar el uso de la madera en lugar de materiales más contaminantes, se estaría tomando una acción concreta para abordar el cambio climático y avanzar hacia una economía baja en carbono.

ANEXO 3.1 Historial de carga CUREE básico simplificado controlado por deformación

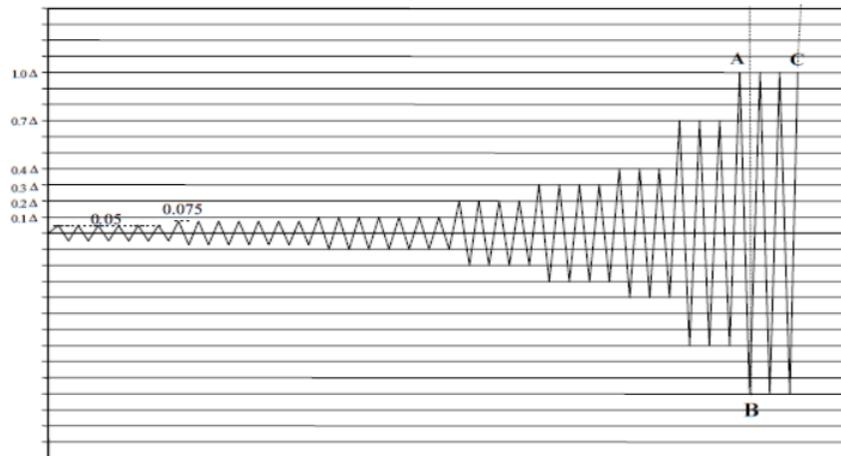


Figura A. 1: Historial de carga CUREE básico simplificado controlado por deformación.
Fuente: Krawinkler *et al* (2001).

ANEXO 3.2 Curvas carga – deformación

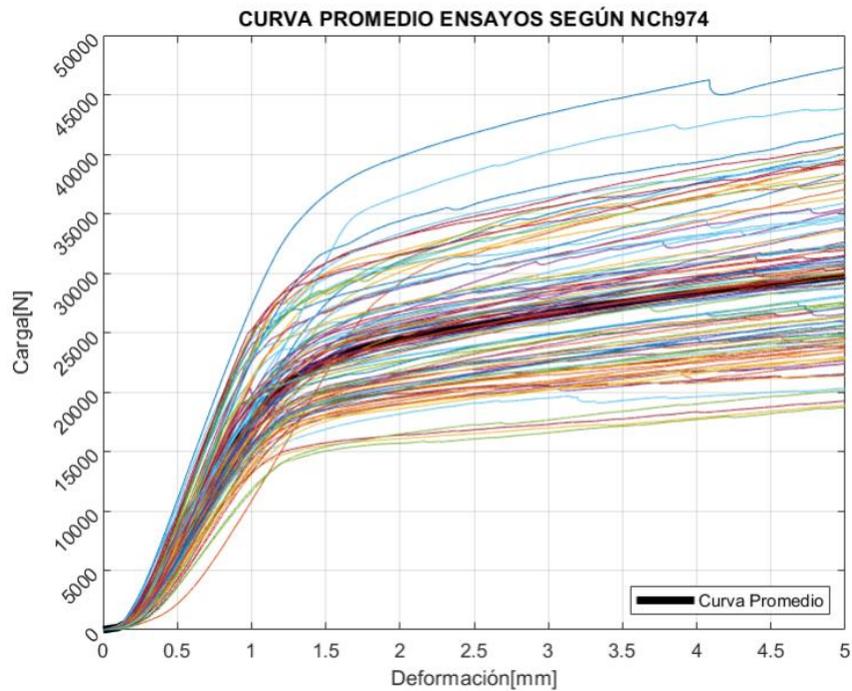


Figura A. 2: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según NCh 974.

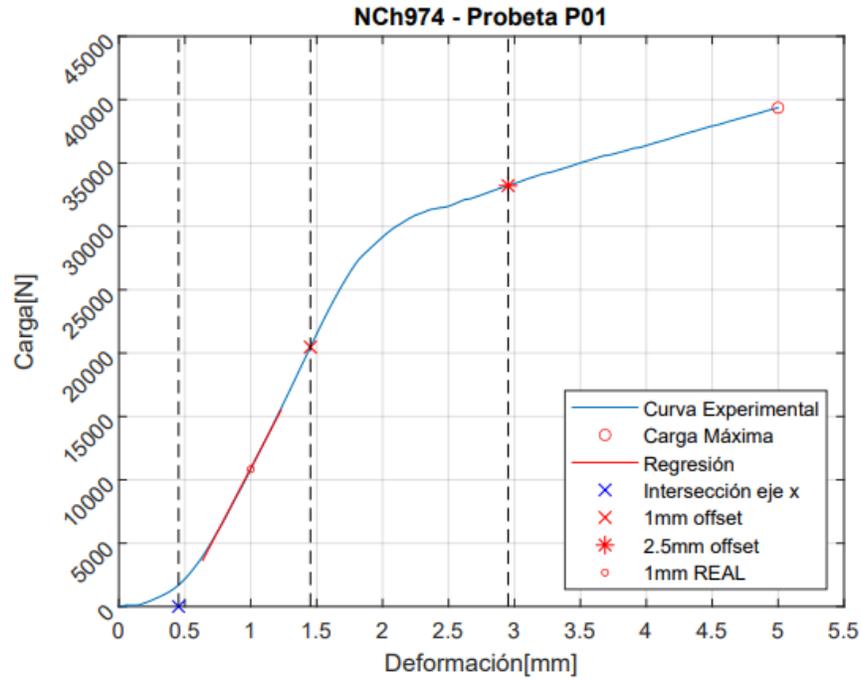


Figura A.3: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según NCh 974.

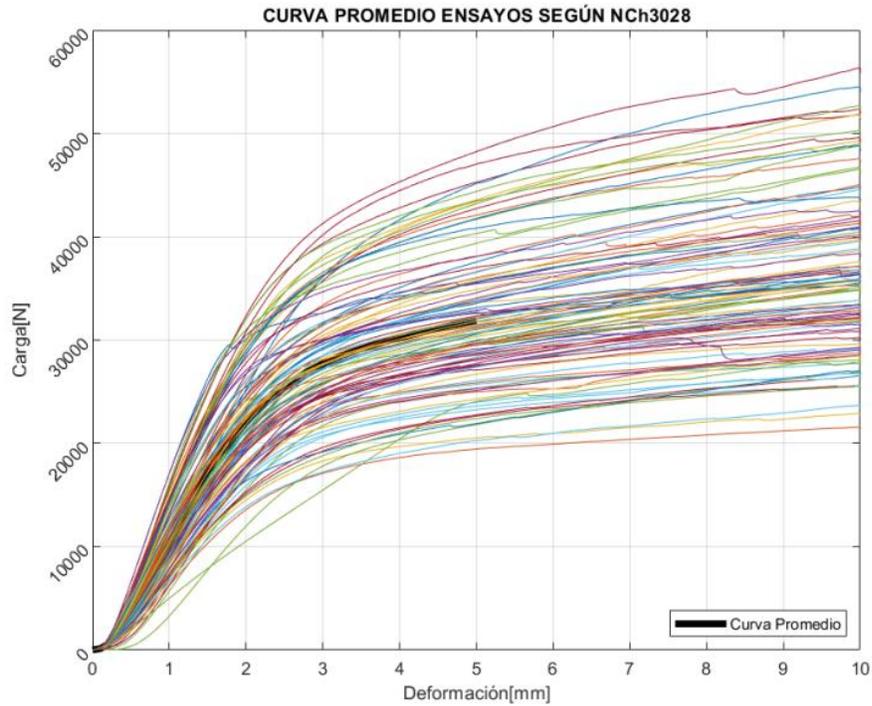


Figura A.4: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según NCh 3028-1.

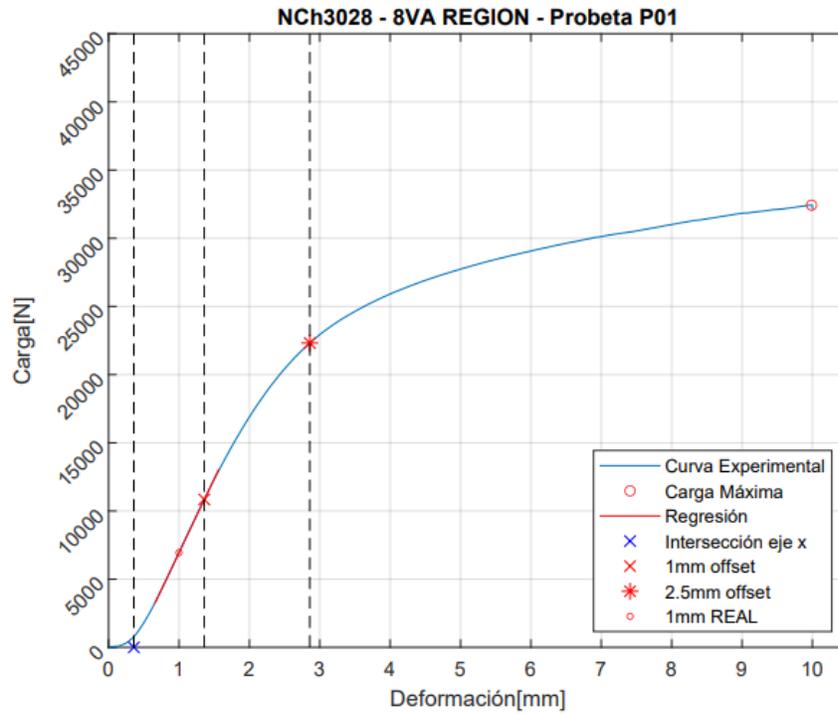


Figura A.5: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según NCh 3028-1.

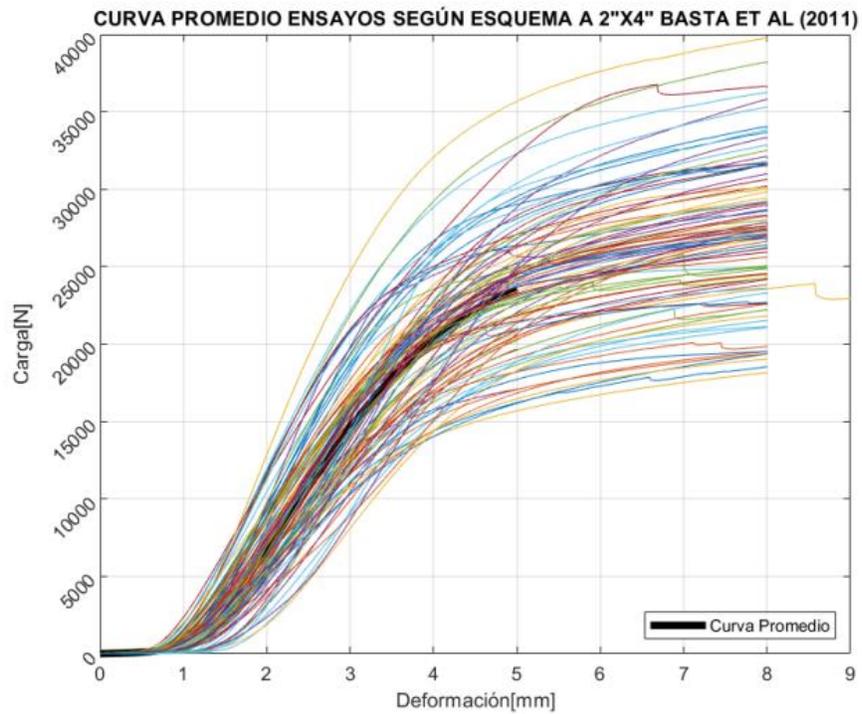


Figura A. 6: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema A 2"x4" Basta et al (2011).

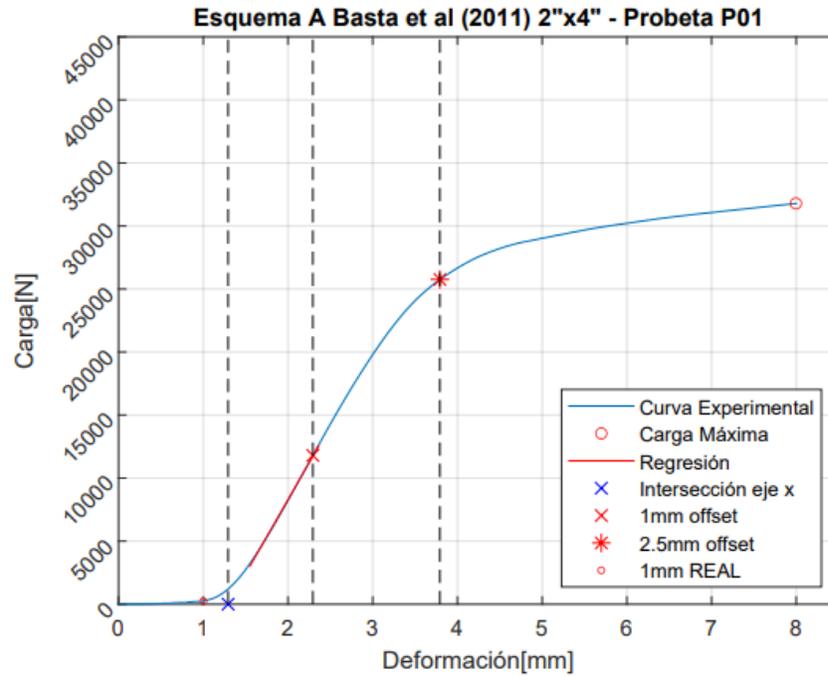


Figura A. 7: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema A 2"x4" Basta et al (2011).

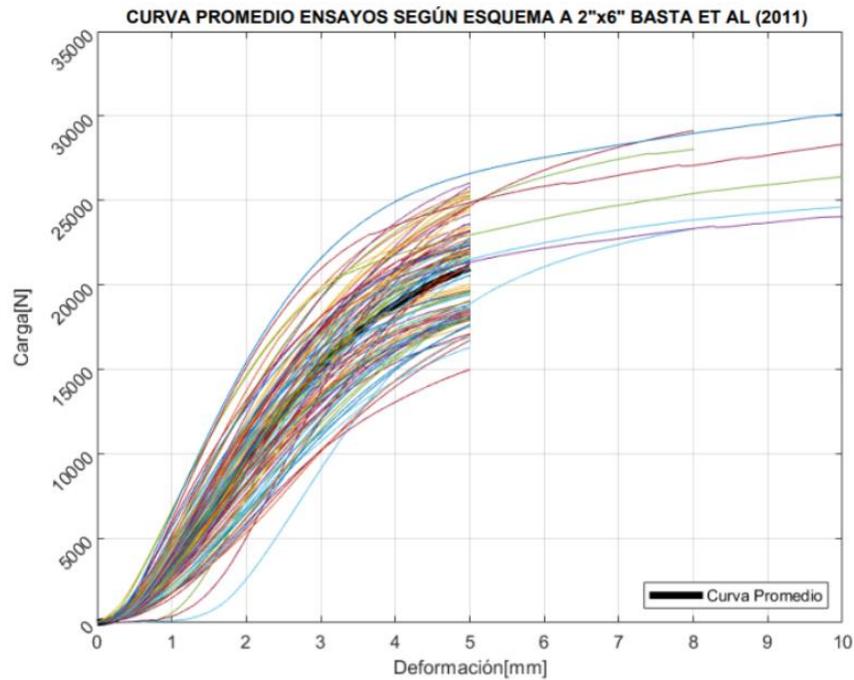


Figura A. 8: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema A 2"x6" Basta et al (2011).

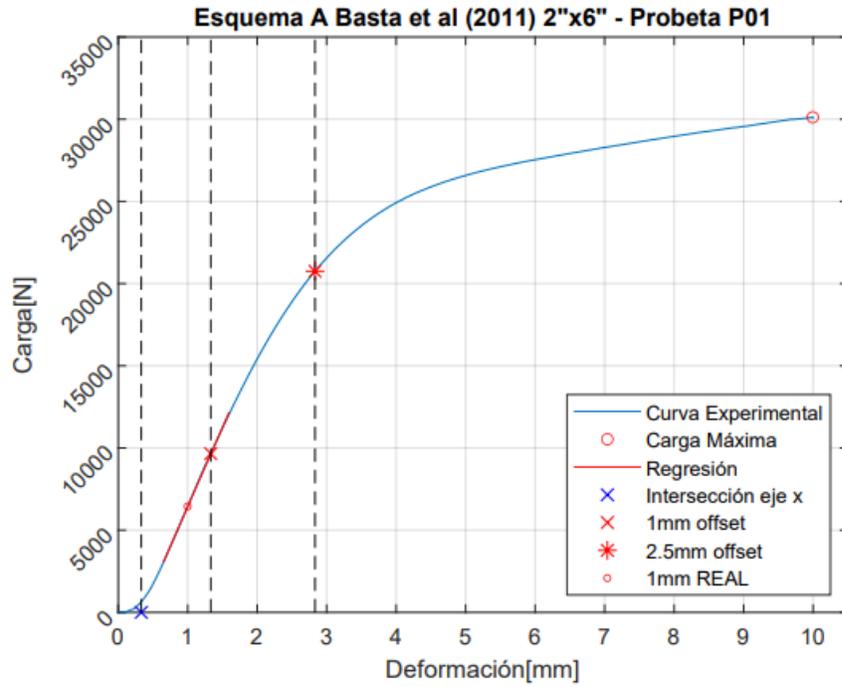


Figura A. 9: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema A 2"x6" Basta *et al* (2011).

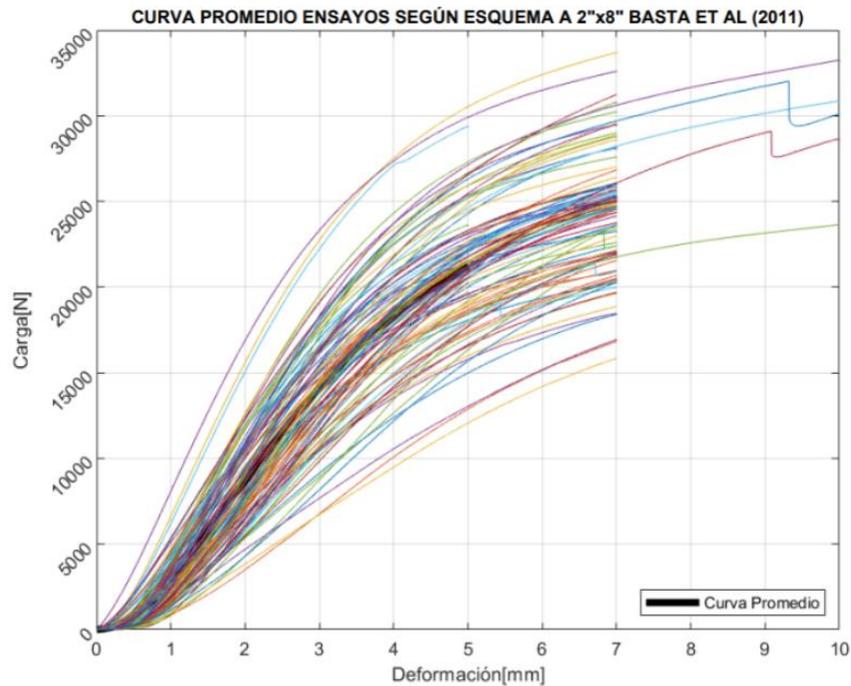


Figura A. 10: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema A 2"x8" Basta *et al* (2011).

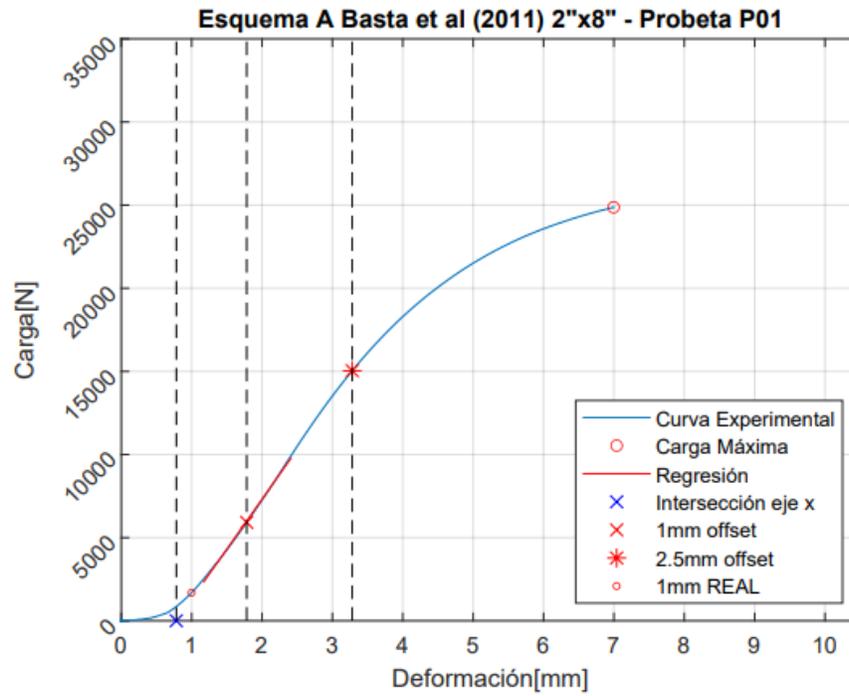


Figura A. 11: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema A 2"x8" Basta *et al* (2011).

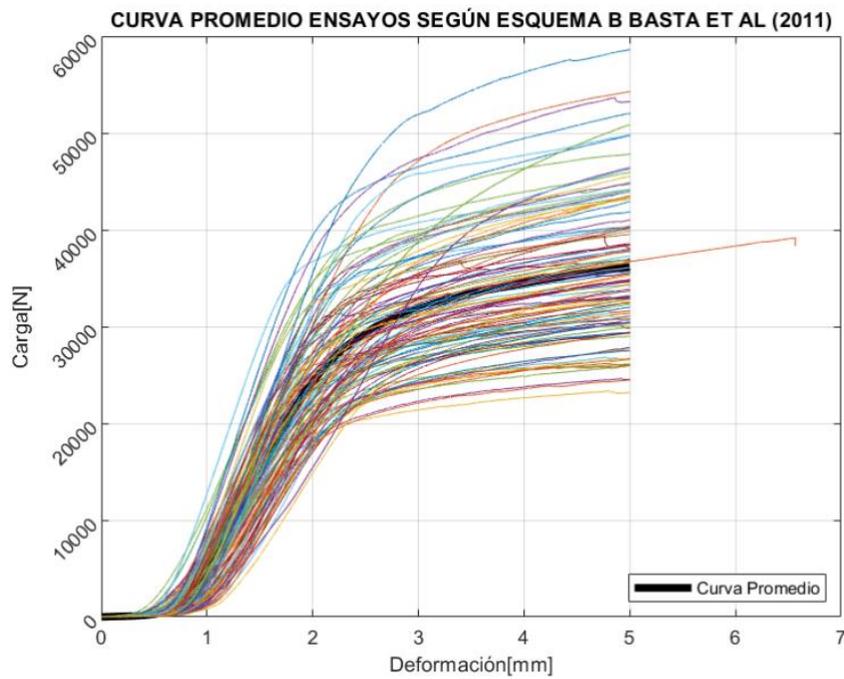


Figura A. 12: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema B Basta *et al* (2011).

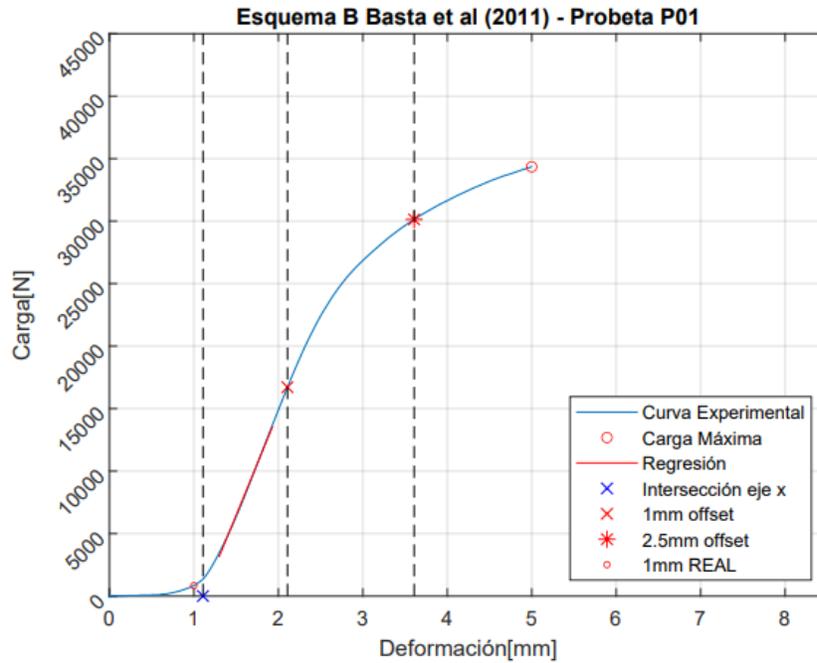


Figura A. 13: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema B Basta *et al* (2011).

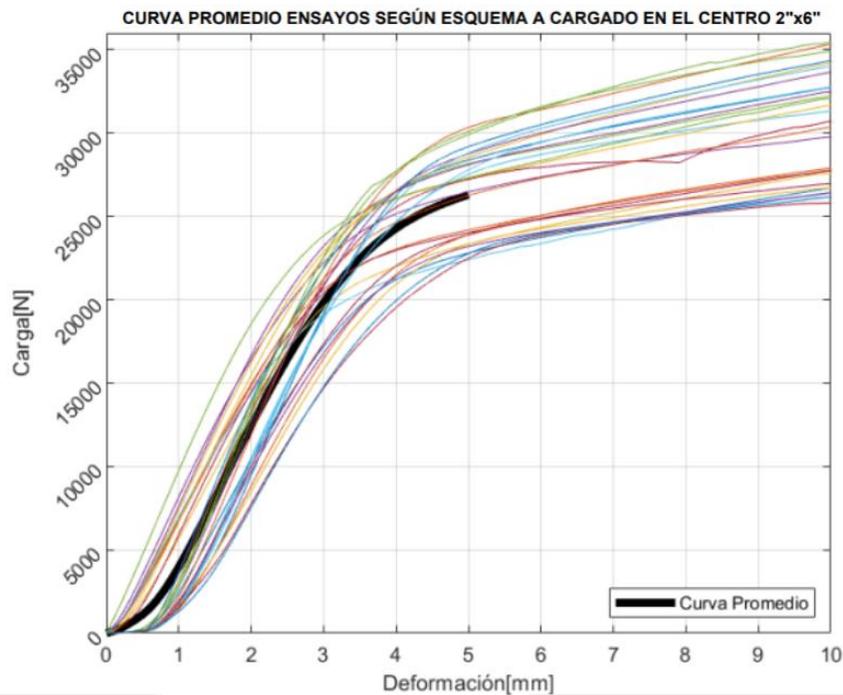


Figura A. 14: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema A cargado en el centro 2"x6".

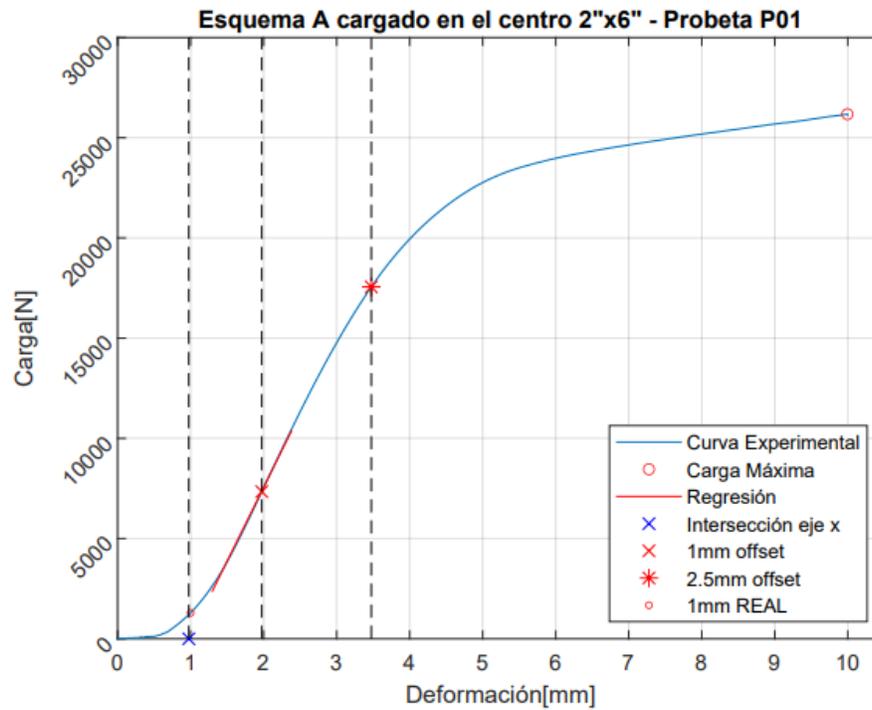


Figura A. 15: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema A cargado en el centro 2''x6''.

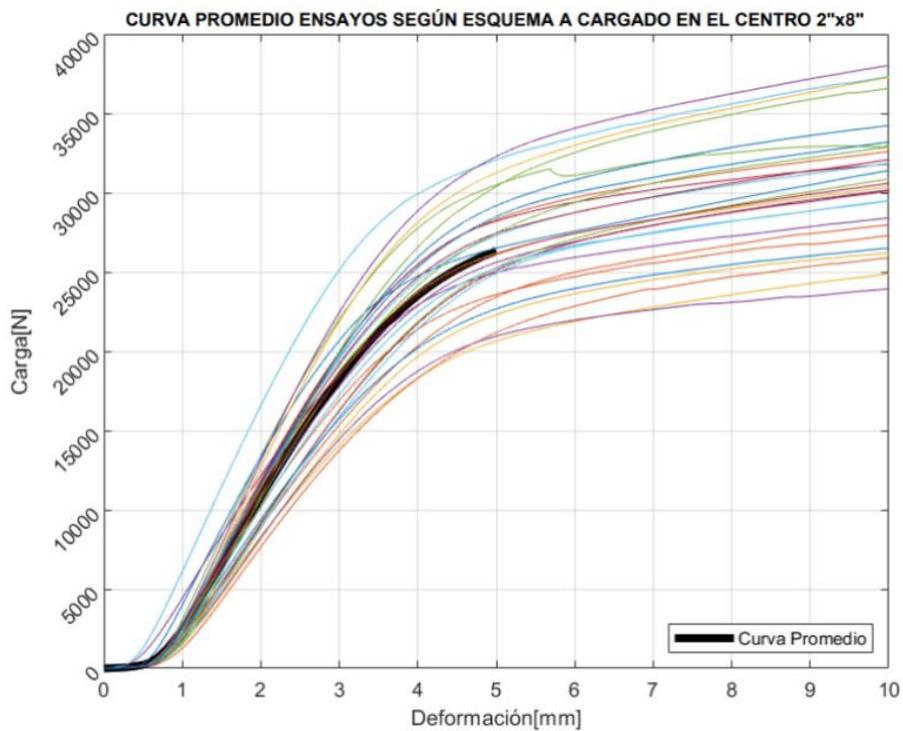


Figura A. 16: Gráfico curva promedio carga-deformación para ensayo según Esquema A cargado en el centro 2''x8''.

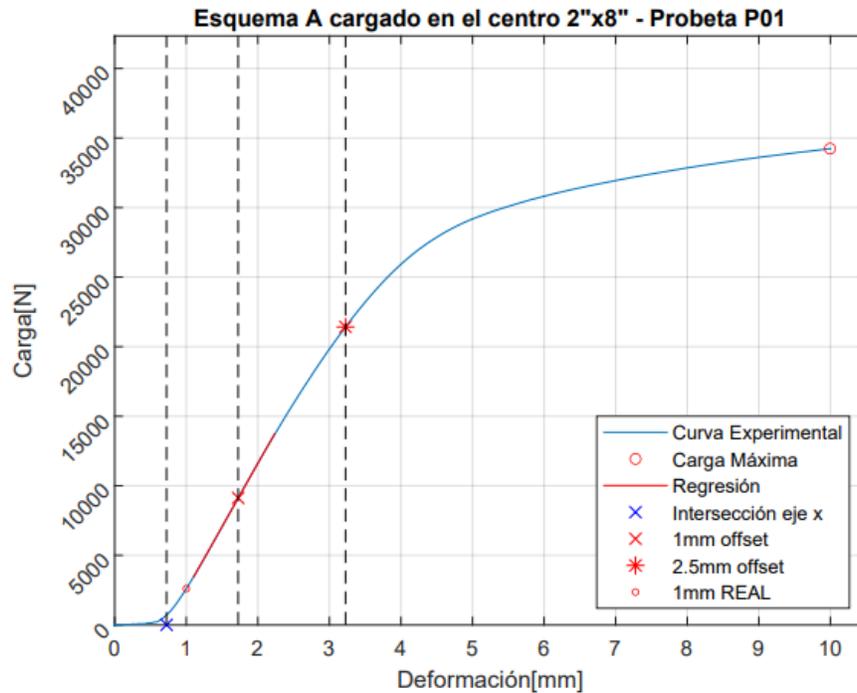


Figura A. 17: Ejemplo de gráfico de datos obtenidos en ensayos según Esquema A cargado en el centro 2"x8".

ANEXO 3.3 Ejemplo de código de programación utilizado para extracción de datos

```
filename = 'p01.txt';
delimiterIn = ';';
headerlinesIn = 5;
A= importdata(filename,delimiterIn,headerlinesIn);
idxmax =find(A.data(:,2)== max(A.data(:,2)));
plot(A.data(:,1),A.data(:,2), 'DisplayName', 'Curva Experimental')
xlim([0 5.5]);
ylim([0 45000]);
cargamaxima = max(A.data(:,2))
j=length(A.data(:,1));
%Deformación en carga máxima
umaxx=[];
for i=1:(j-1)
    if cargamaxima==A.data(i,2)
        umaxx(i)=A.data(i,1);
    else
        i=i+1;
    end
end
umax=max(umaxx)

%Rango de datos para regresión (DATOS ENTRE 10 Y 40% DE LA CARGA MÁXIMA)
L=[];
```

```

LL=[];

for i=1:(j-1)
    if A.data(i,2) < 0.1*cargamaxima
        L(i)=A.data(i,2);
    else
        i=i+1;
    end
end
q=length(L)+1;
for i=1:(j-1)
    if A.data(i,2)< 0.4*cargamaxima
        LL(i)=A.data(i,2);
    else
        i=i+1;
    end
end
q2=length(LL)+1;
rectaX=A.data(q:q2,1);
rectaY=A.data(q:q2,2);
h=length(rectaX);
X(:,1)=ones(1,h);
X(:,2)=rectaX;
B= (X\rectaY);
interY=B(1);
pendiente=B(2);
Y=X*B;
%Intersección de eje X, con la ecuación de la recta de regresión,
ejex=(-interY/pendiente)
oneset= ejex + 1
twofiveset= ejex + 2.5

%R2 de recta de regresión
R2=1-sum((rectaY-(Y)).^2)/sum((rectaY-mean(rectaY)).^2) %Rsq2 en mathworks 2do ajuste
pendiente

%INDICE DE APLASTAMIENTO ECN,H
ECN=[];
for i=1:length(rectaX)
    ECN(i)=(rectaY(i)*41)/((rectaX(i)-ejex)*50*50);
end
ECNh=mean(ECN)/41

%ENCONTRAR LOS PUNTOS DE LA CURVA MÁS CERCANOS A CADA OFFSET
Xmenores=[];
Xmenores2=[];
tramo= A.data(:,1);
lt=length(tramo);
for i=1:(lt-1)
    if A.data(i,1)< oneset
        Xmenores(i)= A.data(i,1);
    else
        i=i+1;
    end
end
end

```

```

posult=length(Xmenores); ult= Xmenores(posult); posult2= length(Xmenores)+1;
v1=A.data(posult,2); v2=A.data(posult2,2); ult2=A.data(posult2,1);
ULTX=[ult ult2];
ULTY=[v1 v2];
res1=interp1(ULTX,ULTY,oneset);
offset1mm=[oneset res1]
for i=1:(lt-1)
    if A.data(i,1)< twofiveset
        Xmenores2(i)=A.data(i,1);
    else
        i=i+1;
    end
end
posultwo=length(Xmenores2); ultwo= Xmenores2(posultwo); posultwo2=length(Xmenores2)+1;
v1two=A.data(posultwo,2); v2two=A.data(posultwo2,2); ultwo2= A.data(posultwo2,1);
ULTX2=[ultwo ultwo2];
ULTY2=[v1two v2two];
res2=interp1(ULTX2, ULTY2, twofiveset);
offset2_5mm=[twofiveset res2]

%ENCONTRAR LOS PUNTOS DE LA CURVA MÁS CERCANOS A 1MM REAL
Xmenores3=[];
for i=1:(lt-1)
    if A.data(i,1)< 1
        Xmenores3(i)=A.data(i,1);
    else
        i=i+1;
    end
end
posultreal=length(Xmenores3); ultreal= Xmenores3(posultreal);
posultreal2=length(Xmenores3)+1;
v1real=A.data(posultreal,2); v2real=A.data(posultreal2,2); ultreal2=
A.data(posultreal2,1);
ULTXREAL=[ultreal ultreal2];
ULTYREAL=[v1real v2real];
res3=interp1(ULTXREAL, ULTYREAL, 1);
REAL1mm= [1 res3]

%GRÁFICO
hold on
plot(A.data(idxmax,1),A.data(idxmax,2), 'o', 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerSize',5, 'DisplayName', 'Carga Máxima')
plot(rectaX,Y, 'r', 'MarkerSize',10, 'DisplayName', 'Regresión')
plot(ejex,0, 'x', 'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerSize',8, 'DisplayName', 'Intersección eje x')
plot(oneset,res1, 'x', 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerSize',8, 'DisplayName', '1mm offset')
plot(twofiveset,res2, '*', 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerSize',8, 'DisplayName', '2.5mm offset')

%1MM REAL
plot(1,res3, 'o', 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerSize',3, 'DisplayName', '1mm REAL')

legend('AutoUpdate', 'off', 'Location', 'southeast')
plot(oneset,0, 'DisplayName', '1mm')
plot(twofiveset,0, 'DisplayName', '2.5mm')
%lineas verticales para cada offset

```

```

R=plot([ejex ejex],[0, 50000],'black',[oneset oneset],[0, 50000],'black',[twofiveset
twofiveset],[0, 50000],'black','MarkerSize',5);
R(1).LineStyle = "--"; R(2).LineStyle = "--"; R(3).LineStyle = "--";
hold off
grid on
ax=gCa;
ax.YAxis.Exponent=0;
ytickangle(45)
xlabel('Deformación[mm]'), ylabel('Carga[N]')

%Cambiar nombre de las probetas
title('NCh974 - Probeta P01')

```

ANEXO 3.4 Ejemplo de datos de entrada y gráficos realizados para ensayos cíclicos

"Precarga"	10	"N"				
"mm"	"N"	"s"	""	"Fuerza de recalcado"	"Tiempo de ensayo"	"Número de ciclo"
0	-2,21924	0	1			
-1,47138e-06	-2,2993	0,06	1			
-1,34877e-06	-2,1876	0,09	1			
-1,96184e-06	-2,27171	0,11	1			
6,13076e-07	-2,34317	0,12	1			
-3,188e-06	-2,85162	0,22	1			
-1,34877e-06	-2,94739	0,32	1			
-3,188e-06	-3,20883	0,42	1			
0,00406372	1,49201	0,52	1			
0,0144129	12,3046	0,6	1			
0,0250606	23,5524	0,68	1			
0,0357182	35,1934	0,76	1			
0,0463835	51,6024	0,84	1			
0,0570425	72,6843	0,92	1			
0,0677088	95,3099	1	1			
0,0783875	116,645	1,08	1			
0,089055	139,786	1,16	1			
0,0997137	164,016	1,24	1			
0,110369	188,723	1,32	1			
0,121013	214,589	1,4	1			
0,131658	244,991	1,48	1			
0,142325	277,406	1,56	1			

Figura A. 18: Documento de texto con datos obtenidos en laboratorio.

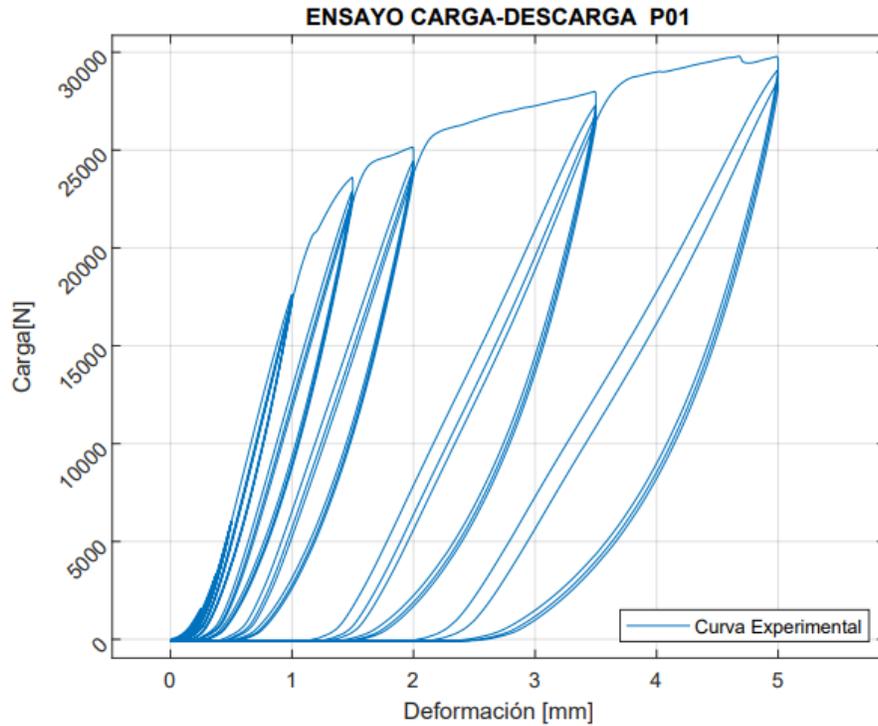


Figura A. 19: Gráfico curva carga-deformación de los datos obtenidos en ensayo de laboratorio.

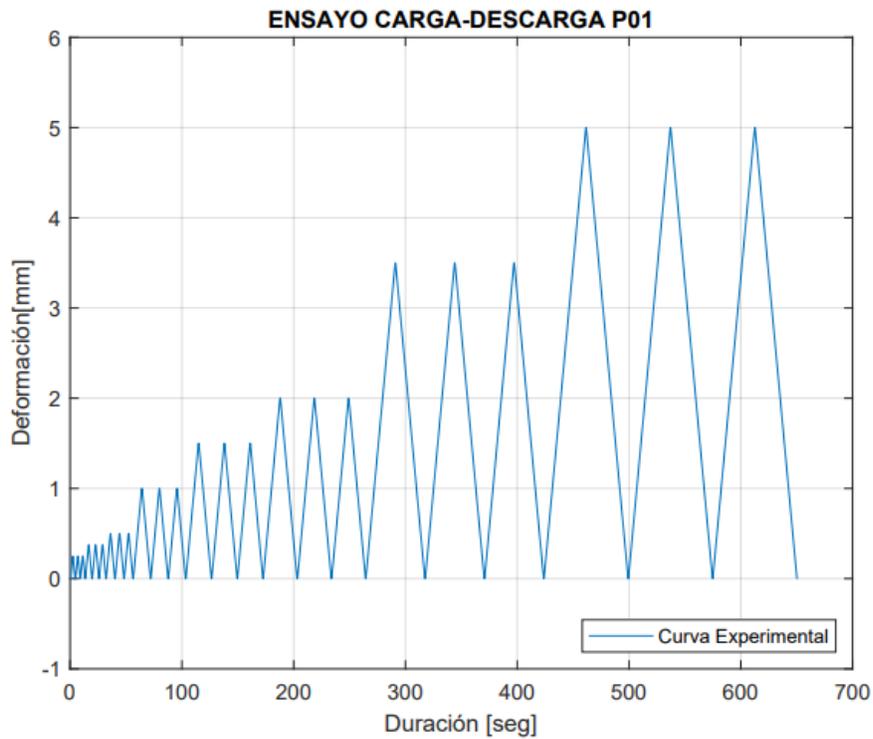


Figura A. 20: Gráfico curva deformación-duración de los datos obtenidos en ensayo de laboratorio.

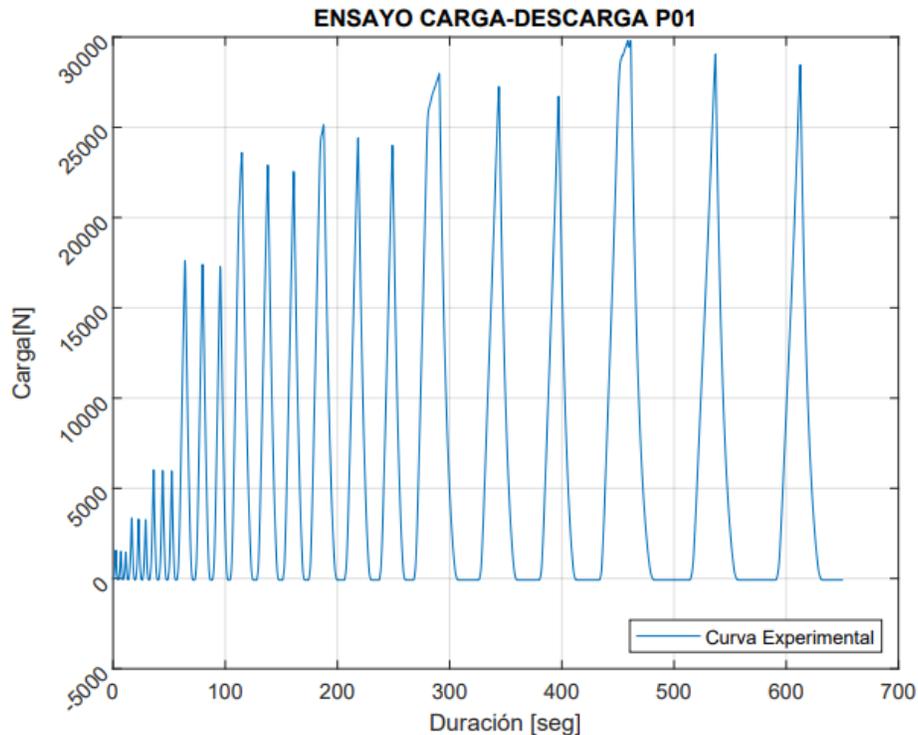


Figura A. 21: Gráfico curva carga-duración de los datos obtenidos en ensayo de laboratorio.

ANEXO 4.1 Análisis de estadística descriptiva

Para interpretar la información obtenida de los ensayos de laboratorio de una forma científicamente válida, se realizó un análisis estadístico de cada uno de los grupos de resultados recopilados, el cual se hace necesario debido a la variabilidad entre datos. Para así, resumirlos y presentarlos correctamente como estadísticas para futuras conclusiones del estudio.

A4.1.1 Medidas de dispersión

El propósito de estas medidas es el cuantificar la variabilidad de los datos, mostrando que tan alejados o diferentes son uno de otro. “Se puede decir que es una medida del grado de concentración o de densidad de los datos en torno a su centro de gravedad” (Antonio Rustom J. ,2012).

- Rango

Medida de amplitud general de la variabilidad de los datos, se obtiene restando el extremo mayor y menor de la muestra.

$$R = X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n} \quad (\text{A.1})$$

- Varianza

Media de las diferencias cuadráticas de n observaciones, con respecto a su media aritmética \bar{x} .

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{A.2})$$

- Desviación estándar

Como las unidades de medida de la varianza se encuentran al cuadrado, se hace necesario obtener la desviación estándar, que se define como la raíz cuadrada de la varianza.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{A.3})$$

- Coeficiente de variación.

Medida de dispersión relativa que ofrece una mayor objetividad de los datos analizados, con la cual se puede determinar niveles de homogeneidad o heterogeneidad de la variabilidad. Por ejemplo, CV < 5% indican generalmente gran homogeneidad, CV < 20% homogeneidad moderada y CV > 50% denota gran heterogeneidad (Antonio Rustom J. ,2012).

$$CV = \left[\frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \right] \% \quad (\text{A.4})$$

A4.1.2 Análisis de varianza (ANOVA) unidireccional

Método estadístico utilizado para determinar si existe alguna diferencia entre las medias de diferentes grupos. El resultado de ANOVA es la “estadística F”, la cual muestra la diferencia de varianza dentro y entre los grupos analizados, produciendo una cifra que permite definir si la hipótesis nula de que las medias de los grupos son igual es aceptada o rechazada, donde para este último caso, la razón F será mayor. Cabe destacar que ANOVA sólo determina si existe o no diferencia entre las medias de los grupos, pero no señala cuales de ellos son los que se diferencian (TIBC, s.f.). A continuación, se presenta el método utilizado para esto último:

- Método de Tukey

Método de comparación de parejas de medias, que permite discernir si las medias de los grupos son significativamente diferentes o no. Siendo su valor crítico dado por:

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(k, N - k) * \sqrt{CM_E/n_i} \quad (\text{A.5})$$

Donde:

CM_E = Cuadrado medio del error (ANOVA)

n_i = Número de observaciones por nivel

k = Número de niveles

$N-k$ = Grados de libertad para el error

α = Nivel de significancia (0.05)

$q_{\alpha}(k, N - k)$ = Puntos porcentuales de distribución del rango estudentizado de tabla de Tukey.

El método de Tukey, está diseñado para tamaño muestrales iguales entre los grupos, por lo que, si se tiene tamaños muestrales distintos, se debe considerar una media armónica entre los tamaños de muestras n_h en vez de n_i (Jaume Llopis Pérez, 2013).

$$n_h = \frac{k}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i}} \quad (\text{A.6})$$

Así, las medias se consideran significativamente diferentes cuando la diferencia absoluta entre los pares de medias sea mayor que T_a .

ANEXO 4.2 Límites de Tolerancia (LT)

Dado que según la normativa chilena NCh 3028-2:2017 de muestreo y evaluación de valores característicos de piezas en tamaño estructural, para todas las propiedades se puede aplicar técnicas paramétricas y no paramétricas, donde, al utilizar el enfoque paramétrico, se parte con la hipótesis que la distribución de probabilidad de la muestra es conocida, si esta hipótesis es rechazada, los resultados pueden ser imprecisos. Comúnmente, pruebas paramétricas se basan en las leyes de distribución normal para analizar los elementos de una muestra. En cuanto al enfoque no paramétrico, es más conservador al anterior, partiendo del desconocimiento del tipo de distribución de la muestra.

Junto a lo considerado para la determinación del tamaño muestral, que según el punto 3.4.3 de la NCh 3028-2, un contenido de 95% sobre el límite de tolerancia y un nivel de confianza del 75%, son apropiados para una propiedad específica de la madera estructural, y el cálculo de los límites de tolerancia están definidos por:

A4.2.1 Enfoque paramétrico

El cálculo del límite de tolerancia con enfoque paramétrico (LTP), se realiza según el punto 3.4.3.2 de la NCh 3028-2:2017, donde este queda dado por:

$$LTP = \bar{X} - K * s \quad (A.7)$$

Y el error estándar (ES) de este estadístico se aproxima a:

$$ES = s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{K^2}{2(n-1)}} \quad (A.8)$$

Donde:

s = desviación estándar de los resultados experimentales;

n = tamaño de la muestra; y

K = factor del nivel de confianza, de Tabla 3 de la NCh3028/2:2017.

Cabe destacar que para la determinación de la resistencia a compresión normal admisible utilizando este enfoque, se utilizó el caso más desfavorable de LTP esperado, el cual sería LTP menos el ES aproximado. Esta consideración del caso más desfavorable proporciona un margen de seguridad adicional y asegura que la resistencia a compresión normal admisible sea adecuada para las condiciones de diseño específicas.

A4.2.2 Enfoque no paramétrico

Primeramente, para el cálculo del límite de tolerancia con enfoque no paramétrico (LTNP), se realiza según Tabla 2 de la NCh 3028-2:2017, utilizando el tamaño de la muestra y la consideración de porcentaje de confianza antes mencionado, junto con el rango de observaciones ordenadas de menor a mayor.

También, se puede obtener el estimador de punto porcentual no paramétrico (EPN), según el punto 4.5.4. de la NCh 3028-2:2017, donde se calcula un EPN para cada valor de la muestra, ordenados de menor a mayor, dado por:

$$EPN = \left[\frac{k}{100} (n + 1) - (j - 1) \right] [x_j - x_{(j-1)}] + x_{(j-1)} \quad (A.9)$$

Donde:

k = estimador del punto porcentual deseado.

También se debe calcular $i/(n+1)$, donde i es el orden del valor y n, tamaño de la muestra. Hasta que $i/(n+1) \geq k/100$.

ANEXO 4.3 Factores de ajuste para estadísticas experimentales.

Para obtener los factores de reducción de las estadísticas experimentales y así, relacionar la propiedad admisible de resistencia de compresión normal a la fibra, se utiliza el factor 1/1.67 que se encuentra en la Tabla 7 de la NCh 3028-2:2017, el cual, según el punto 4.4 de la normativa, es obtenido de ASTM D245, que incluye un factor de seguridad y un efecto de duración acumulada de la carga de 10 años (carga normal).

ANEXO 4.4 Norma Chilena NCh1198:2014 Madera – Construcciones en madera – Cálculo

A4.4.1 Tensiones y módulos elásticos para madera Pino Radiata

Tabla A. 1: Tensiones admisibles y módulo de elasticidad en flexión para Pino Radiata seca: H=12%, MPa.

Grado estructural	Tensiones admisibles de:					Módulo de elasticidad en flexión	Índice de aplastamiento en compresión normal
	Flexión ¹⁾	Compresión paralela	Tracción paralela ¹⁾	Compresión normal	Cizalle		
	F_f MPa	F_{cp} MPa	F_{tp} MPa	F_{cn} MPa	F_{cz} MPa		
a) Visuales							
GS	11,0	8,5	6,0	2,5	1,1	10 500	5,65
G1	7,5	7,5	5,0	2,5	1,1	10 000	
G1 y mejor	9,5	7,8	5,5	2,5	1,1	10 100	
G2	5,4	6,5	4,0	2,5	1,1	8 900	
b) Mecánicos							
C24	9,3	8,0	4,7	2,5	1,1	10 200	5,65
C16	5,2	7,5	3,5	2,5	1,1	7 900	
MGP 10	8,4	10	4,0	2,5	1,3	10 000	
MGP 12	13,5	15,5	6,0	2,5	1,3	12 700	
1) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal ≤ 90 mm, excepto en los Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12, para los que el límite se incrementa hasta 160 mm. 2) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal ≥ 180 mm, excepto en los Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12, cuyos valores son aplicables sobre cualquier altura de sección transversal. El módulo de elasticidad característico inherente al percentil del 5%, E_{fk} , se puede estimar como $0,60 E_f$.							

Fuente: (INN, 2014).

A4.4.2 Estimación de aplastamiento en piezas de Pino Radiata

El aplastamiento de la superficie de una pieza de madera aserrada de Pino radiata, cuando se somete a una tensión uniforme de compresión normal a la fibra, puede ser estimado utilizando las siguientes expresiones expresado en milímetros (mm).

$$\delta_{ef} = \delta_e + 0.4 \text{ mm} \quad \text{para piezas secas con } H < 20\% \quad (\text{A.10})$$

$$\delta_{ef} = \delta_e + 0.2 \text{ mm} \quad \text{para piezas con } H \geq 20\% \quad (\text{A.11})$$

Con $\delta_e = \frac{f_{ap}}{E_{cn,h}}$, donde f_{ap} corresponde a la tensión efectiva de aplastamiento y $E_{cn,h}$ al índice de aplastamiento perpendicular a la fibra por unidad de altura de escuadría. Para obtener un aplastamiento estimado asociado a un margen de error de acuerdo al percentil del 95%, se recomienda aplicar las expresiones siguientes:

$$\delta_{ef,95\%} = \delta_e + 0.8 \text{ mm} \quad \text{para piezas secas con } H < 20\% \quad (\text{A.12})$$

$$\delta_{ef,95\%} = \delta_e + 0.7 \text{ mm} \quad \text{para piezas con } H \geq 20\% \quad (\text{A.13})$$

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Eduardo Enrique Vivallo Martínez
Título de la memoria : Resistencia y rigidez normal a la fibra en madera Pino Radiata sometida a compresión normal.
Fecha de la presentación oral :
Profesor(es) Guía : Rodrigo Silva Muñoz
Profesor(es) Revisor(es) : Siva Avudaiappan
Jorge Catalán
Peter Dechent
Concepto :
Calificación :

Resumen

La alta contaminación ambiental a nivel mundial debido a la construcción ha generado interés en el uso de la madera en aplicaciones estructurales. Aunque Chile es un país forestal, la construcción en madera es inferior a la de países de Norteamérica y Europa. Con el objetivo de lograr en la construcción la carbono neutralidad, se espera construir edificios de mediana altura en base a madera. Sin embargo, la madera presenta un comportamiento anisotrópico que afecta su resistencia ante cargas en diferentes direcciones, especialmente en estructuras de mediana a gran altura. Este estudio se centra en analizar la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra en elementos de madera utilizados en marcos livianos y sus entramados. El objetivo principal es obtener información precisa sobre la resistencia y rigidez de la madera normal a su fibra, en condiciones reales de construcción, proporcionar datos confiables para el diseño estructural y sentar las bases para una futura actualización de la normativa. Se consideraron esquemas de ensayo que reflejaran las condiciones reales de construcción, siguiendo las pautas del Instituto Nacional de Normalización (INN) como también, pruebas adicionales basadas en estudios previos. Los resultados indicaron diferencias significativas entre los ensayos de interacción madera-madera y el ensayo normado actual. Se propuso utilizar los resultados de rigidez y deformación de los ensayos de interacción madera-madera como una alternativa para estimar el comportamiento en aplicaciones estructurales típicas. Además, se destaca la importancia de considerar una deformación de 1 mm en los ensayos para determinar el valor admisible de resistencia a la compresión perpendicular a la fibra según la normativa NCh 974. Por consiguiente, este trabajo de investigación contribuye significativamente al campo de la resistencia a compresión normal a la fibra de la madera Pino Radiata en Chile.