



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



**DESARROLLO DE METODOLOGIA DE DISEÑO Y ANÁLISIS DE VIGAS
LAMINADAS CLAVADAS**

POR

Catalina Sofía Antonieta Velásquez Zapata

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

Profesor Revisor
Patricio Cendoya

Profesional Externo
Cristian Reyes
Peter Dechent

Noviembre 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Catalina Velásquez Zapata

© 2023 Catalina Velásquez Zapata

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

DEDICATORIA

Dedicado a

Mi Tata Rubén y mi Abuelita Lidia, por convertirme en la persona que soy;

A toda mi familia, en especial a mi madre Doris por su fuerza y cariño incondicional, que ha sido un factor clave en mi vida personal y profesional;

A los doctores y todo el personal de salud que contribuyeron con su granito de arena y permitieron que hoy sea capaz de terminar mi carrera;

A mis profesores por sus enseñanzas, orientación, por su gran apoyo y comprensión;

A mis amigos y seres queridos que me han acompañado en todo momento;

A mi Seba, que siempre estuvo en las noches de estudio ronroneando al lado mío;

La contribución de cada uno de ustedes fue fundamental para mi desarrollo personal y académico.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincero agradecimiento al Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR) por su valiosa contribución al facilitar acceso a sus instalaciones, y proporcionar los datos, materiales y herramientas necesarias. Su colaboración ha resultado fundamental para llevar a cabo esta investigación. Expreso mi gratitud a Don Gonzalo Hernández, Gerente del Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR), por la valiosa oportunidad de participar en este proyecto, así como por su continua consideración. Asimismo extendo mi agradecimiento a todos los profesionales de LME-INFOR que ofrecieron orientación y asesoramiento durante el transcurso de esta investigación. La experiencia y conocimientos que aportaron en el campo resultaron fundamentales para la concepción y evolución exitosa del proyecto. Además, deseo destacar y dar las gracias a Don Cristian Reyes, quien estuvo a cargo del estudio, por su dirección, apoyo constante y paciencia demostrada a lo largo de todo el proceso.

Agradezco a todos los docentes que compartieron sus conocimientos durante mi trayectoria académica, contribuyendo de manera significativa en mi formación profesional. Quisiera agradecer particularmente al Dr. Patricio Cendoya y Dr. Rodrigo Silva, por su tiempo, su apoyo, su excelente disposición y sobre todo por confiar en mí.

Estoy especialmente agradecida con el Dr. Peter Dechent Anglada, por su valiosa enseñanza y contribución en mi paso por la universidad, agradezco profundamente el apoyo entregado durante todo el proceso de este trabajo, por su inmensa paciencia, por su tiempo y buena disposición que va más allá de sus obligaciones académicas, demostrando ser además de un excelente profesional una excelente persona, agradezco también por demostrarme su confianza en mis capacidades, y ayudarme a “*tomar el toro por las astas*” para así tener la motivación y fuerza necesarias para terminar esta Memoria de título.

Por último quiero agradecer a mi madre, tíos, primos, amigos y seres queridos por su constante preocupación y apoyo entregado durante todos estos años, pero especialmente en esta última etapa.

Agradezco sobre todo a Dios por guiarme y protegerme durante el camino, por ser mi fortaleza y brindarme una vida llena de aprendizajes.

RESUMEN

Chile enfrenta desafíos en vivienda y medio ambiente, la construcción con madera, en particular el Nail Laminated Timber (NLT), surge como una solución innovadora para la construcción sostenible. En este contexto las vigas laminadas clavadas y los pisos de madera clavados emergen como una solución estructuralmente robusta y versátil. La elección de vigas laminadas clavadas exige una consideración meticulosa en cuanto a la instalación de clavos. Esta conexión mecánica tiende a generar cierta flexibilidad en la dirección longitudinal de las juntas, convirtiéndolas en elementos compuestos flexibles.

El objetivo principal de esta investigación es obtener información precisa sobre la resistencia y rigidez de uniones clavadas de madera, lo que ayuda a comprender el mecanismo de deformación en la interfaz de clavado, contribuyendo al avance de la mecánica estructural específica para vigas laminadas clavadas. Estas relaciones en la interfaz de clavado, a su vez, podrían incorporarse en modelos estructurales, facilitando la metodología del diseño y análisis de vigas NLT. Para ello, se realizó una revisión de literatura científica y técnica, así como un análisis de las normativas vigentes. En la primera línea de investigación se realizaron esquemas de ensayo que reflejan el comportamiento de uniones clavadas bajo cargas paralelas y perpendicular a la fibra. En base a los resultados se obtuvieron módulos de corrimiento del clavo, los cuales fueron analizados estadísticamente y comparados con estimaciones en base a normativas. En la segunda línea de investigación se analizaron ensayos de vigas laminadas clavadas, dispuestas de canto y de manera horizontal, considerando dos alternativas de fabricación, vigas sin empalme o continuas y vigas con empalmes a tope, el estudio permitió evaluar la rigidez de las vigas clavadas en laminación vertical y horizontal. Este análisis permitió evaluar la rigidez de las vigas clavadas en laminación vertical y horizontal. Se confirmó una mayor rigidez en las vigas continuas en comparación con las vigas con empalmes a tope. Además, se evidenció un aumento de rigidez en las vigas dispuestas en laminación vertical en contraste con las vigas dispuestas en laminación horizontal.

Los resultados proporcionan módulos de corrimiento del clavo, comparados estadísticamente con estimaciones normativas respaldando el cálculo de dicho módulo y su potencial aplicación en la elaboración de modelos de vigas laminadas clavadas. Este estudio enriquece la comprensión del comportamiento estructural y promueve la integración de estas vigas en la construcción sostenible.

ABSTRACT

Chile faces challenges in housing and the environment; construction with wood, particularly Nail Laminate Timber (NLT), emerges as an innovative solution for sustainable construction. In this context, nailed laminated beams and nailed wooden floors emerge as a structurally robust and versatile solution. Choosing nailed laminated beams requires careful consideration in nail installation. This mechanical connection tends to generate a certain flexibility in the longitudinal direction of the joints, turning them into flexible composite elements.

The main objective of this research is to obtain precise information about the strength and stiffness of nailed wood joints, which helps to understand the deformation mechanism at the nailing interface, contributing to the advancement of specific structural mechanics for nailed laminated beams. These relationships at the nailing interface, in turn, could be incorporated into structural models, facilitating the methodology of NLT beam design and analysis. To this end, a review of scientific and technical literature was carried out, as well as an analysis of current regulations.

In the first line of research, test schemes were carried out that reflect the behavior of nailed joints under loads parallel and perpendicular to the fiber. Based on the results, nail shifting modules were obtained, which were statistically analyzed and compared with estimates based on regulations. In the second line of research, tests of nailed laminated beams were analyzed, arranged on edge and horizontally, considering two manufacturing alternatives, beams without splices or continuous beams and beams with butt splices. The study allowed evaluating the rigidity of the nailed beams. in vertical and horizontal lamination. This analysis allowed us to evaluate the stiffness of the beams nailed in vertical and horizontal lamination. Higher stiffness was confirmed in continuous beams compared to butt spliced beams. Furthermore, an increase in stiffness was evident in the beams arranged in vertical lamination in contrast to the beams arranged in horizontal lamination.

The results provide nail shift moduli, statistically compared with normative estimates supporting the calculation of said modulus and its potential application in the development of models of nailed laminated beams. This study enriches the understanding of structural behavior and promotes the integration of these beams in sustainable construction.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	20
1.1 Motivación.....	20
1.2 Objetivo General.....	21
1.3 Objetivos específicos.....	21
1.4 Metodología de trabajo.....	21
1.5 Principales resultados	23
1.6 Organización del documento.....	23
CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
2.1 Introducción.....	24
2.2 Elementos mecánicos de unión.....	24
2.3 Uniones de madera clavada	24
2.4 Madera laminada clavada /Nail Laminated Timber (NLT).....	25
2.5 Módulo de deslizamiento o módulo de corrimiento.....	26
2.6 Comentarios sobre el módulo de deslizamiento de conexiones clavadas	26
2.7 Antecedentes sobre el diseño de uniones	27
2.8 Investigación sobre laminación horizontal y vertical en vigas laminadas clavadas.....	28
2.9 Investigación sobre modelación de vigas laminadas clavadas con laminación horizontal .	31
2.10 Conclusiones.....	33
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	34
3.1 Introducción.....	34
3.2 Equipos y Materiales	34
3.2.1 Piezas Probetas Ensayos a Tracción.....	34
3.2.2 Piezas Probetas Ensayos a Compresión Perpendicular	35
3.2.3 Piezas Probetas Ensayos de vigas.	35
3.2.4 Clavos.....	36
3.2.5 Pistola Neumática.....	36
3.2.6 Medidor de humedad.....	37
3.2.7 Balanza digital.....	37
3.2.8 Máquina para ensayos de uniones.....	37

3.2.9	Máquina para ensayos de vigas.....	38
3.3	Realización de Ensayos de Uniones Clavadas	38
3.3.1	Ensayos a tracción paralela.....	39
3.3.2	Ensayos a compresión perpendicular.....	39
3.4	Obtención de Propiedades físicas de las probetas de ensayo de uniones.	40
3.5	Ajuste en deformaciones de curvas a tracción.....	40
3.6	Obtención de Acomodo inicial curvas.....	41
3.7	Puntos de interés y cálculos según norma EN26891	42
3.8	Pendientes en las fases de carga	42
3.9	Deformaciones remanentes.....	43
3.10	Curvas carga-deformación promedio y desviación estándar de la curva promedio.	43
3.11	Curva Carga-Deformación Individual de un clavo	44
3.12	Módulo de deslizamiento según normativas.....	44
3.13	Realización de Ensayos de Vigas laminadas Clavadas.....	44
3.14	Determinación del módulo de elasticidad local y global en flexión.	46
3.15	Conclusiones.....	46
CAPÍTULO 4	ANÁLISIS Y RESULTADOS	47
4.1	Introducción.....	47
4.2	Análisis y resultados de Ensayos de Uniones.....	47
4.2.1	Propiedades físicas.....	47
4.2.2	Acomodo inicial curvas	48
4.2.3	Puntos de interés norma EN26891.....	48
4.2.4	Cálculos según norma EN26891.....	50
4.2.5	Pendientes en las fases de carga.....	51
4.2.6	Deformaciones remanentes.....	53
4.2.6.1	Comparación Deformaciones remanentes ensayos a tracción y compresión.....	54
4.2.7	Máximos de carga y deformación de la unión	54
4.2.7.1	Comparación de deformación máxima entre ensayos tracción y compresión	56
4.2.7.2	Comparación de cargas máximas entre ensayos tracción y compresión:.....	56
4.2.8	Curva Carga-Deformación Promedio de la unión	57
4.2.9	Curva Carga-Deformación Individual de los Clavos.....	59
4.3	Cálculo de la capacidad de diseño que puede transmitir la unión.	60
4.4	Módulos de corrimiento.....	61
4.5	Gráfico ensayos de vigas laminación vertical	63
4.6	Gráfico ensayos de vigas laminación horizontal	65

4.7	Resultados de Ensayos de vigas NLT en laminación vertical	66
4.8	Resultados de Ensayos de vigas NLT en laminación horizontal.....	68
4.9	Comparación resultados viga en laminación vertical y laminación horizontal.	69
4.10	Relaciones constitutivas en la interfaz de clavado de uniones	71
4.11	Modelación de vigas laminadas clavadas	72
4.12	Conclusiones	74
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES		75
5.1	Conclusiones.....	75
5.2	Futuras líneas de investigación.....	77
REFERENCIAS		78
ANEXOS.....		79
ANEXO 1.1	Contribución a los objetivos sostenibles	79
ANEXO 1.2	Datos Propiedades físicas de las probetas.	81
ANEXO 1.3	Acomodo inicial curvas	82
ANEXO 1.4	Referencias a norma EN 26891-199.....	83
ANEXO 1.5	Cálculo de la capacidad de diseño que puede transmitir la unión.	84
1.5.1	Determinación de tipo de cizalle:	86
1.5.2	Estimación de Capacidad Admisible del clavo:	86
1.5.3	Estimación de Capacidad de diseño:	87
ANEXO 1.6	Referencias a norma EN 408:2010.....	89
ANEXO 1.7	Gráficos ensayos uniones	91
1.7.1	Gráficos Curvas Tracción.....	91
1.7.2	Gráficos curvas compresión	92
1.7.3	Gráfico Curvas Carga- Deformación ensayos Compresión y ensayos Tracción.....	93
1.7.4	Gráfico Curva Promedio Carga- Deformación Tracción	94
1.7.5	Gráfico Curva Promedio Carga- Deformación compresión.....	95
1.7.6	Gráfico Curva Promedio Carga- Deformación compresión y tracción	97
ANEXO 1.8	Resultados de Ensayos de vigas NLT.....	98

ANEXO 1.9	Códigos Matlab utilizados.....	100
ANEXO 1.10	Estadística descriptiva.....	103
1.10.1	Promedio de los resultados.....	103
1.10.2	Valor mínimo.....	103
1.10.3	Valor máximo.....	103
1.10.4	Rango.....	103
1.10.5	Desviación estándar.....	103
1.10.6	Coficiente de variación.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1. RESUMEN ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS.....	47
TABLA 4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ACOMODOS EN CURVAS A COMPRESIÓN	48
TABLA 4.3 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS PUNTOS DE INTERÉS ENSAYO TRACCIÓN.....	49
TABLA 4.4 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS PUNTOS DE INTERÉS ENSAYO COMPRESIÓN	49
TABLA 4.5 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA CÁLCULOS NORMA EN26891 ENSAYOS A TRACCIÓN	50
TABLA 4.6 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA CÁLCULOS NORMA EN26891 ENSAYOS A COMPRESIÓN	51
TABLA 4.7 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA PENDIENTES K1 Y K2 DE ENSAYOS A TRACCIÓN.	51
TABLA 4.8 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA PENDIENTES K1 Y K2 DE ENSAYOS A COMPRESIÓN.	52
TABLA 4.9 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE DEFORMACIONES REMANENTES ENSAYOS TRACCIÓN.....	53
TABLA 4.10 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE DEFORMACIONES REMANENTES ENSAYOS COMPRESIÓN....	54
TABLA 4.11 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA MÁXIMOS CURVAS TRACCIÓN.	55
TABLA 4.12 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA MÁXIMOS CURVAS COMPRESIÓN	55
TABLA 4.13 MÓDULOS DE CORRIMIENTO EN UN CLAVO	61
TABLA 4.14 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA RESULTADOS PARA VIGAS EN LAMINACIÓN VERTICAL CONTINUA.	66
TABLA 4.15 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA RESULTADOS PARA VIGAS EN LAMINACIÓN VERTICAL CON EMPALMES.....	66
TABLA 4.16 DIFERENCIA ENTRE RESULTADOS PARA VIGAS EN LAMINACIÓN VERTICAL.	67
TABLA 4.17 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA RESULTADOS PARA VIGAS EN LAMINACIÓN HORIZONTAL.	68
TABLA 4.18 DIFERENCIA ENTRE RESULTADOS PARA VIGAS EN LAMINACIÓN HORIZONTAL.	68
TABLA 4.19 DIFERENCIA DE RESULTADOS ENTRE VIGAS EN LAMINACIÓN VERTICAL Y HORIZONTAL. ...	69
TABLA A1.2.1 REGISTRO DE HUMEDAD Y DENSIDAD PROBETAS TRACCIÓN.	81
TABLA A1.2.2 REGISTRO DE HUMEDAD Y DENSIDAD PROBETAS COMPRESIÓN	81
TABLA A1.5.1 MODELO DE FLUENCIA PARA MEDIOS DE UNIÓN SOLICITADOS EN EXTRACCIÓN LATERAL.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 CURVA CARGA-DESLIZAMIENTO TÍPICA PARA CONEXIONES DE MADERA CON PASADORES.	25
FIGURA 2.2 ILUSTRACIONES CONFIGURACIÓN DE PANELES DE NLT.....	25
FIGURA 2.3 . SECCIÓN TRANSVERSAL CON LAMINACIÓN HORIZONTAL.....	28
FIGURA 2.4 SECCIONES TRANSVERSALES DE VIGAS CON LAMINACIÓN VERTICAL.....	28
FIGURA 2.5. RESULTADOS DE CARGA, DESPLAZAMIENTO, RELACIÓN DE CARGA Y FACTOR DE DUCTILIDAD DE LAS MUESTRAS EN LAMINACIÓN HORIZONTAL.	29
FIGURA 2.6 RESULTADOS DE CARGA, DESPLAZAMIENTO, RELACIÓN DE CARGA Y FACTOR DE DUCTILIDAD DE LAS MUESTRAS EN LAMINACIÓN VERTICAL	30
FIGURA 2.7 A) PATRÓN DE CLAVADO 2/4.....	31
FIGURA 2.8 DEFLEXIONES PARA LOS PATRONES DE CLAVADO 2/4 Y 4/4.....	32
FIGURA 2.9 DESLIZAMIENTO PARA LOS PATRONES DE CLAVADO 2/4 Y 4/4.....	32
FIGURA 3.1 PROBETA ENSAYO A TRACCIÓN PARALELA.....	35
FIGURA 3.2 PROBETA ENSAYO A COMPRESIÓN PERPENDICULAR	35
FIGURA 3.3. PATRÓN DE CLAVADO EN LÁMINAS CONSECUTIVAS.	36
FIGURA 3.4 PROBETA VIGA CONTINUA.....	36
FIGURA 3.5 PROBETA VIGA CON EMPALME.....	36
FIGURA 3.6. COMPRESOR DE AIRE MARCA INDURA	36
FIGURA 3.7 MEDIDOR DE HUMEDAD.....	37
FIGURA 3.8 BALANZA DIGITAL.....	37
FIGURA 3.9 MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL ZWICKROELL PROLINE Z100	37
FIGURA 3.10 MÁQUINA DE ENSAYOS A FLEXIÓN	38
FIGURA 3.11 PROCEDIMIENTO DE CARGA TEÓRICO.	38
FIGURA 3.12 ESQUEMA DE ENSAYO TRACCIÓN.....	39
FIGURA 3.13 IMPLEMENTACIÓN ENSAYO DE.....	39
FIGURA 3.14 ESQUEMA DE ENSAYO COMPRESIÓN	40
FIGURA 3.15 IMPLEMENTACIÓN ENSAYO DE COMPRESIÓN EN UNIONES CLAVADAS.....	40
FIGURA 3.16 DEFORMACIÓN MEDIDA EN.....	41
FIGURA 3.17 DEFORMACIÓN EN UNA.....	41

FIGURA 3.18 CURVA DE CARGA-DEFORMACIÓN IDEALIZADA Y PUNTOS DE INTERÉS	42
FIGURA 3.19 PENDIENTE CARGA INICIAL.....	42
FIGURA 3.20 PENDIENTE EN LA SEGUNDA FASE CARGA.....	42
FIGURA 3.21 DEFORMACIÓN REMANENTE (\square_R).....	43
FIGURA 3.22 ESQUEMA DE ENSAYO PARA DETERMINACIÓN	45
FIGURA 3.23 IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE RIGIDEZ GLOBAL	45
FIGURA 3.24 ESQUEMA DE ENSAYO PARA DETERMINACIÓN	45
FIGURA 3.25 IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE RIGIDEZ LOCAL	45
FIGURA 3.26 VIGA EN LAMINACIÓN VERTICAL.....	46
FIGURA 3.27 VIGA EN LAMINACIÓN HORIZONTAL	46
FIGURA 4.1 CURVA DE CARGA-DEFORMACIÓN IDEALIZADA Y PUNTOS DE INTERÉS	48
FIGURA 4.2 CURVA PROMEDIO DE LA UNIÓN A TRACCIÓN Y COMPRESIÓN.....	57
FIGURA 4.3 CURVA PROMEDIO TRACCIÓN, CURVA PROMEDIO MÁS DESVIACIÓN ESTÁNDAR, CURVA PROMEDIO MENOS DESVIACIÓN ESTÁNDAR.....	58
FIGURA 4.4 CURVA PROMEDIO COMPRESIÓN, CURVA PROMEDIO MÁS DESVIACIÓN ESTÁNDAR, CURVA PROMEDIO MENOS DESVIACIÓN ESTÁNDAR.....	59
FIGURA 4.5 CURVA CARGA-DEFORMACIÓN INDIVIDUAL DE LOS CLAVOS EN TRACCIÓN Y COMPRESIÓN.	60
FIGURA 4.6 CAPACIDAD DE LA UNIÓN VS CURVAS PROMEDIO.....	61
FIGURA 4.7 COMPARACIÓN DE MÓDULOS DE CORRIMIENTO	62
FIGURA 4.8 CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN VIGAS LAMINACIÓN VERTICAL PARA MOE LOCAL.....	64
FIGURA 4.9 CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN VIGAS LAMINACIÓN VERTICAL PARA MOE GLOBAL	64
FIGURA 4.10 CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN VIGAS LAMINACIÓN VERTICAL HASTA ROTURA.....	65
FIGURA 4.11 CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN VIGAS LAMINACIÓN HORIZONTAL PARA MOE LOCAL. .	65
FIGURA 4.12 CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN VIGAS LAMINACIÓN VERTICAL PARA MOE GLOBAL.....	66
FIGURA 4.13 COMPARACIÓN RIGIDEZ GLOBAL VIGAS LAMINACIÓN VERTICAL Y LAMINACIÓN HORIZONTAL.	70
FIGURA 4.14 COMPARACIÓN RIGIDEZ LOCAL VIGAS LAMINACIÓN VERTICAL Y LAMINACIÓN HORIZONTAL.	71
FIGURA 4.15.....	72
FIGURA 4.16 ESQUEMA CORTE FRONTAL DE LA VIGA CLAVADA DE LAMINACIÓN HORIZONTAL, MODELACIÓN DE CONECTORES CON RIGIDEZ K	73

FIGURA 4.17 A) ESQUEMA DE CORTE LATERAL (SECCIÓN) DE VIGA CLAVADA CON LAMINACIÓN VERTICAL	73
FIGURA 4.18 A) ESQUEMA VISTA CORTE SUPERIOR VIGA CLAVADA EN LAMINACIÓN VERTICAL,.....	74
FIGURA A1.3.1 CURVA CON ACOMODO INICIAL Y SIN ACOMODO INICIAL. (CON AUMENTO DE ESCALA)	82
FIGURA A1.3.2 CURVA CON ACOMODO INICIAL Y SIN ACOMODO INICIAL. (SIN AUMENTO DE ESCALA)	82
FIGURA A1.4.1 CÁLCULOS APARTADO 8.5 NORMA EN 26891-1991	83
FIGURA A1.5.1 CLAVOS EN CIZALLE SIMPLE Y CIZALLE DOBLE.	84
FIGURA A1.5.2 MODOS DE FLUENCIA EN UNIONES DE MADERA CON ELEMENTOS DE FIJACIÓN MECÁNICOS	84
FIGURA A1.7.1.1 CURVAS CARGA VS DEFORMACIÓN (2□□.....	91
FIGURA A1.7.1.2 CURVAS AJUSTADAS, CARGA VS DEFORMACIÓN (□□.....	91
FIGURA A1.7.2.1 CURVAS CARGA VS DEFORMACIÓN COMPRESIÓN ORIGINALES, CONSIDERANDO ACOMODO.....	92
FIGURA A1.7.2.2 CURVAS CARGA VS DEFORMACIÓN COMPRESIÓN MODIFICADAS, SIN ACOMODO.	92
FIGURA A1.7.3.1 CURVAS TRACCIÓN ORIGINAL VS CURVAS COMPRESIÓN.	93
FIGURA A1.7.3.2 CURVAS TRACCIÓN AJUSTADA VS CURVAS COMPRESIÓN.	93
FIGURA A1.7.4.1 CURVA PROMEDIO CARGA- DEFORMACIÓN TRACCIÓN	94
FIGURA A1.7.4.2 CURVAS ENSAYOS A TRACCIÓN, CURVA PROMEDIO TRACCIÓN, Y ENVOLVENTE DE LA CURVA PROMEDIO ± DESVIACIÓN ESTÁNDAR.....	94
FIGURA A1.7.6.1 GRÁFICO CURVA PROMEDIO CARGA- DEFORMACIÓN COMPRESIÓN Y TRACCIÓN...	97
FIGURA A1.9.1 CÓDIGO PARA OBTENER CURVA CARGA-DEFORMACIÓN PROMEDIO.	100
FIGURA A1.9.2 CÓDIGO PARA OBTENER PUNTOS DE INTERÉS DE NORMA EN26891-1991.....	101

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Para 2050, según las proyecciones del INE (2018), se espera que Chile llegue a una población de 21,6 millones de personas. Dentro de este contexto, el déficit habitacional, es un desafío pendiente y una problemática que es necesario resolver. El déficit habitacional al año 2017 era de aproximadamente 740 mil viviendas, según datos entregados por la Cámara Chilena de la Construcción.

Considerando que Chile forma parte del acuerdo de la COP25, existe la necesidad de hacer cambios en la industria de la construcción, e impulsar y, fomentar materiales como la madera, cuyo uso ayuda a reducir el CO₂ de la atmósfera, contribuyendo de esta manera a mitigar el cambio climático. La madera presenta beneficios funcionales, económicos y sociales que recomiendan su uso intensivo en la construcción. (INFOR, 2020)

Del punto de vista estructural, la madera es un material confiable, la resistencia de la madera a los esfuerzos mecánicos de tracción, compresión, flexión, y cizalle, en general es buena, no obstante, depende de la dirección en que se apliquen las fuerzas y de la especie con la cual se esté trabajando, los cuales se pueden encontrar especificados en las normativas. Las soluciones constructivas basadas en madera pueden presentar un desempeño similar o incluso superior al de otros materiales frente a un movimiento telúrico, (CORMA, 2022)

La madera laminada clavada NLT (Nail Laminated Timber) consiste en una serie de tablonces de madera unidos mediante clavos o tornillos para formar un elemento estructural sólido. Las aplicaciones para NLT incluyen pisos, cubiertas, techos y paredes. (Think Wood, 2022). La madera laminada clavada presenta facilidad de transporte y de trabajabilidad, volviéndose un elemento versátil al momento de construir, además presenta una variedad de elementos de unión disponibles, cuyos métodos y procedimientos de diseño están especificados en la norma NCh 1198:2014. “Madera - Construcciones en madera.”

Considerando que Chile es uno de los mayores productores de madera del mundo (CORMA,2022), el potencial desarrollo del NLT se debe tanto a la posibilidad de emplear madera nacional como también a la facilidad de fabricación del producto, puesto que se puede elaborar sin necesidad de tecnologías costosas, abriendo oportunidades a aserraderos o microempresas. En este contexto, considerando que

en obra es muy difícil utilizar adhesivos para la construcción in situ, las vigas NLT representan una alternativa a las vigas laminadas encoladas, buscando además disminuir la cantidad de químicos dentro de la madera.

En las vigas NLT es necesario prestar atención en la utilización de los clavos, pues en este tipo de conexión mecánica, es común que las juntas presenten cierta flexibilidad en la dirección longitudinal, lo que las convierte en elementos compuestos flexibles. Esto contrasta significativamente con las secciones compuestas convencionales, como el hormigón armado, donde se considera una unión rígida entre el acero y el hormigón, y la rigidez del conector entre ambos materiales se considera infinita. En el ámbito de la construcción en madera, esta conexión rígida solo se presupone en el caso de las vigas laminadas encoladas.

Con esta investigación se propone una alternativa de viga que puedan satisfacer las necesidades constructivas de la industria, contribuyendo al desarrollo de la mecánica estructural para vigas laminadas clavadas. Para ello se requiere conocer el mecanismo de deformación en la interfaz del clavado, que permitan proponer relaciones constitutivas, que luego podrán ser incorporadas en los modelos estructurales permitiendo facilitar la metodología del diseño y análisis de vigas de NLT.

1.2 Objetivo General

Desarrollar metodología conceptual para análisis para vigas laminadas clavadas.

1.3 Objetivos específicos

- Definir relaciones constitutivas para la relación carga-deformación de los clavos que permitan conocer y describir el mecanismo de deformación en la interfaz del clavado.
- Evaluar experimentalmente modulo elástico (MOE) local y global en vigas NLT.
- Desarrollar conceptualmente el modelo de análisis para vigas clavadas.

1.4 Metodología de trabajo

Primero, se realizó una revisión de la literatura científica y técnica, que abarcó estudios previos, normativas y metodologías previamente establecidas. El objetivo principal de esta revisión fue

adquirir un profundo entendimiento de las diversas interacciones entre los componentes de las uniones clavadas para analizar su rigidez.

Durante el periodo comprendido entre julio y septiembre de 2022, se realizaron ensayos de tracción paralela y compresión perpendicular en uniones clavadas, además de 10 ensayos de flexión en vigas laminadas clavadas. La ejecución de estos ensayos se efectuó en las instalaciones del Laboratorio de Madera Estructural (LME) del Instituto Forestal (INFOR).

El objetivo de los ensayos de uniones a tracción y compresión fue determinar las capacidades admisibles de carga en el sentido paralelo y perpendicular a la fibra de la madera respectivamente. Los ensayos de las vigas laminadas clavadas se realizan con la finalidad de evaluar experimentalmente el módulo de elasticidad local y global en las vigas de madera clavada.

Ya realizados los ensayos, se realiza un análisis de estadística descriptiva a cada conjunto de resultados obtenidos en función del tipo de ensayo efectuado. Adicionalmente, se analizaron los gráficos obtenidos para cada tipo de ensayo, realizando comentarios señalando lo observado y describiendo las tendencias de comportamiento detectadas.

Para la formulación conceptual del modelo de análisis de vigas laminadas clavadas, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva que abarcó investigaciones previas relacionadas con las propiedades de las láminas de madera, las dimensiones de las vigas y las características de los clavos. El objetivo de esta revisión fue analizar y comprender las distintas interacciones presentes en las vigas laminadas clavadas. Posteriormente se incorporan las relaciones constitutivas obtenidas de los ensayos de unión paralela a la fibra, estas relaciones permiten tener en cuenta la respuesta de los clavos a las cargas aplicadas, así como su capacidad para transferir fuerzas entre las láminas que conforman las vigas NLT.

1.5 Principales resultados

En los ensayos de uniones, se examinó el comportamiento inicial de las curvas, se evaluó la respuesta de la unión ante un ciclo de carga y descarga. Para ello, se calcularon las pendientes de las dos fases de carga y se determinó la deformación remanente. Además, se identificaron las fuerzas y deformaciones máximas alcanzadas en los ensayos.

Mediante el análisis estadístico descriptivo, se calcularon los promedios de los parámetros de interés, lo que facilitó la comprensión del comportamiento de las uniones sometidas a tracción y compresión. Este enfoque permitió realizar una comparación de los resultados obtenidos en ambos tipos de ensayos.

1.6 Organización del documento

El presente documento consta de cinco capítulos. El segundo capítulo corresponde a un resumen de los principales conceptos para comprender el comportamiento de las uniones clavadas y de las vigas laminadas clavadas, se incluyen algunas de sus investigaciones, y alcances normativos.

En el tercer capítulo se describe la metodología utilizada para realización de los ensayos de laboratorio, junto con la explicación de la metodología empleada para el análisis de los resultados.

En el cuarto capítulo se detallan los resultados obtenidos y se comparan los distintos casos de estudio. Finalmente, en el capítulo cinco se entregan los principales resultados obtenidos y comentarios agregando futuras temáticas de investigación.

CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Introducción

En el presente capítulo se detallan los conceptos generales necesarios para comprender el elemento estructural de madera laminada clavada y el comportamiento de las uniones clavadas, profundizando en el mecanismo de deformación en la interfaz de clavado. Posteriormente se presentan investigaciones sobre las vigas de madera laminada clavada (NLT) y su comportamiento según influencia de la especie o el tipo de laminación que presente. Además, se presentan las normativas existentes para el diseño de conexiones.

2.2 Elementos mecánicos de unión

Son aquellos que, al quedar solicitados por fuerza de cizalle, admiten corrimientos relativos entre las piezas conectadas, los que se originan como consecuencia de las deformaciones por aplastamiento de la madera en la zona de contacto entre ella y el medio de unión, y adicionalmente, en el caso de medios de unión de forma cilíndrica, por las deformaciones de flexión que ellos experimentan. (NCh 1198:2014.)

2.3 Uniones de madera clavada

Las conexiones de madera unidas mecánicamente se han estudiado ampliamente en la literatura y han ganado cada vez más interés en diferentes laboratorios de investigación en todo el mundo. La mayoría de las conexiones en forma de punta, como tornillos o clavos, son muy antiguas y todavía una práctica actual porque son rápidas y no requieren de un equipo demasiado sofisticado. La ductilidad y la capacidad de disipar energía, cruciales en el diseño sísmico, son otras ventajas de las conexiones con clavos y tornillos. (Meghlat, Oudjene, Ait-Aider, & Batoz, 2013)

En estructuras de madera, las propiedades de deformación de la conexión tienen un rol importante en la estabilidad general de la estructura y en la distribución de fuerzas internas. Básicamente, el comportamiento de una conexión se describe principalmente por la relación carga-deslizamiento no lineal (Figura 2.1) que relaciona la carga transmitida por la conexión con el deslizamiento relativo de los miembros ensamblados. (Meghlat, Oudjene, Ait-Aider, & Batoz, 2013)

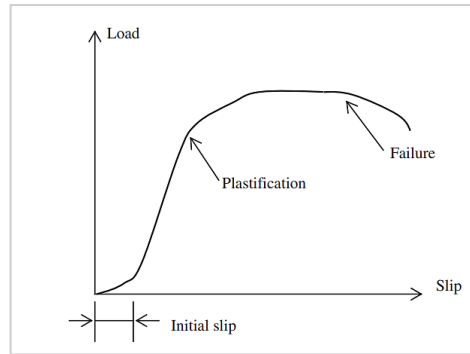


Figura 2.1 Curva carga-deslizamiento típica para conexiones de madera con pasadores.

Fuente: (Meghlat, Oudjene, Ait-Aider, & Batoz, 2013)

En general, todos los tipos de uniones de madera exhiben una parte de deslizamiento inicial, seguida de un comportamiento lineal para deslizamientos relativamente pequeños, pero la rigidez de la conexión disminuye a medida que aumenta la carga y el comportamiento global en todo el rango de carga es no lineal. (Meghlat, Oudjene, Ait-Aider, & Batoz, 2013)

2.4 Madera laminada clavada /Nail Laminated Timber (NLT)

La madera laminada clavada es un elemento estructural de madera maciza creado colocando miembros de madera dimensionada individuales apilados, sujetando las laminaciones individuales con clavos para crear un elemento estructural más grande. Figura 2.2 presenta el NLT (reThink Wood, 2017).

Típicamente utilizado como pisos y techos, NLT también se puede usar para paredes, huecos de ascensores y huecos de escaleras. La madera contrachapada/OSB añadida a una cara puede proporcionar capacidad de corte en el plano, lo que permite que el producto se use como muro de corte o diafragma. (Think Wood, 2022).



Figura 2.2 ilustraciones configuración de paneles de NLT.

Fuente: <https://www.silvaspan.com/mass-timber/>

El comportamiento estructural de NLT está determinado por su estructura ortotrópica, especialmente, por la carga en la dirección transversal siendo transferida con la ayuda de sujetadores mecánicos. Se han adoptado diferentes métodos para determinar el desempeño estructural del NLT, algunos de estos métodos son analíticos mientras que otros son experimentales.

El método analítico puede implicar análisis con simulación, codificación y modelado, mientras que la evaluación experimental implica prueba de paneles de tamaño completo o secciones de paneles con una relación específica de luz a profundidad. El problema con el enfoque experimental es que cada vez que cambia el patrón de clavado, el tipo de sujetador o el tipo de material o cualquiera de los parámetros de fabricación, es necesario realizar una nueva prueba para evaluar las propiedades de flexión de tales productos. (Haller & Pannke, 1998)

2.5 Módulo de deslizamiento o módulo de corrimiento

Se define como la relación entre la fuerza de corte aplicada a una unión o interfaz y el desplazamiento relativo que se produce entre las dos superficies en contacto debido a esa fuerza. Se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$\text{Módulo de Corrimiento} \left(\frac{N}{mm} \right) = \frac{\text{Fuerza de Corte}(N)}{\text{Desplazamiento Relativo} (mm)}$$

2.6 Comentarios sobre el módulo de deslizamiento de conexiones clavadas

La deformación de la conexión tiene una influencia importante en la rigidez de la viga y la distribución de fuerzas internas. Para cuantificar esta influencia, se requiere conocer el comportamiento mecánico de la conexión, expresado por su relación carga-deslizamiento no lineal. En el rango elástico lineal, la carga y el deslizamiento están relacionados por el módulo de deslizamiento. (Mascia & Santana, 2009)

El estudio de la rigidez de uniones semirrígidas cargadas lateralmente en piezas de madera se justifica por la influencia que la deformación de la unión tiene sobre los desplazamientos globales de la estructura en la que se utiliza, así como sobre la distribución de esfuerzos internos.

Las conexiones semirrígidas cargadas lateralmente se caracterizan por la aparición de deslizamiento entre las piezas de madera conectadas. La eficacia de la interacción entre las piezas de madera y, por tanto, la rigidez de la estructura depende de la rigidez de los conectores.

2.7 Antecedentes sobre el diseño de uniones

En las estructuras de madera uno de los aspectos más importantes del diseño, reside en una adecuada solución de las uniones. El diseño y la materialización de éstas, no solo debe brindar una adecuada seguridad, sino también conocer su comportamiento y/o mecanismos de deformación, en orden a limitar la deformación de la estructura completa. (Jimenez Von Bischoffshausen, 1990)

La metodología de diseño de uniones con medios de unión mecánicos resulta prácticamente común para todos ellos, difiriendo únicamente en las expresiones de la capacidad admisible de carga y en la magnitud de ciertos parámetros de aplicación común. En general esta se puede resumir en las siguientes etapas:

- Selección del medio de unión en función de las fuerzas a traspasar, dimensiones de maderos en la unión, condicionantes de arquitectura, restricciones de montaje, restricciones de deformación, condiciones de servicio particulares, etc.
- Determinación de la capacidad de carga básica del medio de unión, en función del calibre de este, de los espesores de los maderos convergentes a la unión y de la o las especies forestales de los mismos. Las capacidades de carga básica se establecen habitualmente considerando dos situaciones límite: solicitaciones paralelas a la dirección de la fibra de la madera y solicitaciones normales a la misma.
- Adecuamiento de la capacidad de carga básica a las condiciones específicas del diseño, incorporando el efecto del contenido de humedad de la madera, la duración acumulada durante la vida útil de la construcción, y la fuerza considerada en el diseño. Este valor se define como carga de diseño.
- Determinación de la cantidad de medios de unión requerida evaluando el cociente entre la fuerza de diseño o capacidad y la carga de diseño, cociente que en definitiva equivale a un factor de utilización (FU).

- Distribución del número requerido de medios de unión sobre la superficie de contacto entre los maderos de manera de evitar partiduras o rajaduras en los maderos debido a una disposición excesivamente próxima a los medios de unión entre sí o a los bordes de los maderos.

2.8 Investigación sobre laminación horizontal y vertical en vigas laminadas clavadas

Se probaron especímenes de vigas laminadas clavadas con laminación horizontal y vertical de la especie madera Albasia, cuyo módulo de elasticidad está entre 5000-7200 MPa, su contenido de humedad es de aproximadamente 12%. El clavo utilizado fue de 2mm de diámetro y 38mm de longitud. Se probaron e investigaron 12 especímenes de vigas con laminación horizontal y 9 con laminación vertical. Las vigas tienen una longitud de $L=2400\text{mm}$ entre apoyos. (Tjondro, Budianto, & Aryakusuma, 2011).

Para las 12 vigas con laminación horizontal, se fabricaron cuatro variaciones de viga con diferentes patrones de clavado. Los cuatro tipos de vigas en laminación horizontal según su espaciamiento entre clavos se designaron con el nombre A, B, C y D, con espaciamiento a 25, 50, 75 y 100 mm en dos filas. Las 12 vigas fabricadas presentan la misma sección rectangular que se muestra en la figura 2.3.

Para las nueve vigas con laminación vertical, se fabricaron tres variaciones de secciones transversales: rectangular, sección I y caja que según su sección se designaron con el nombre R, I, y B respectivamente; todas se fabricaron con el mismo espaciado entre clavos. La Figura 2.4 muestra las secciones con laminación vertical utilizadas, todas con espaciamiento a 40mm.

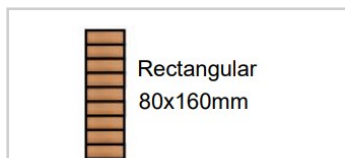


Figura 2.3 . Sección transversal con laminación horizontal.

Fuente: Tjondro, Budianto, & Aryakusuma, 2011

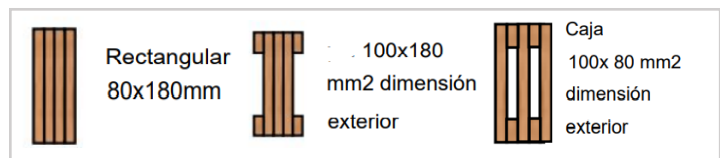


Figura 2.4 Secciones transversales de vigas con laminación vertical.

Fuente: Tjondro, Budianto, & Aryakusuma, 2011

Se obtuvo la carga (P_a) con desplazamiento permitido (δ_a) de las vigas en el límite de capacidad de servicio, la deflexión permitida para los requisitos de servicio $L/300$ fue de 8mm.

Se determinó la carga (P_p) y el desplazamiento (δ_p) para el límite proporcional donde la deformación deja de seguir una relación lineal.

Se presenta además la carga última a rotura (P_u) y la deformación última (δ_u).

La figura 2.5 muestra la carga, desplazamiento, relación de carga y factor de ductilidad de las muestras A, B, C y D en laminación horizontal. La figura 2.6 muestra la carga, desplazamiento, relación de carga y factor de ductilidad de las muestras R, B, I en laminación vertical.

Donde:

P_a/P_p : relación entre la carga con desplazamiento permitido y la carga proporcional.

P_a/P_u : relación entre la carga con desplazamiento permitido y la carga última.

μ_u : factor de ductilidad de desplazamiento.

No	P_a (kN)	δ_a (mm)	P_p (kN)	δ_p (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	P_a/P_p	P_a/P_u	μ_u
A-1	2.62	8.00	3.82	16.64	9.13	109.60	0.69	0.29	6.59
A-2	2.32	8.00	3.26	14.28	11.54	201.32	0.71	0.20	14.10
A-3	2.78	8.00	3.65	13.16	11.66	205.28	0.76	0.24	15.60
B-1	2.08	8.00	3.15	16.68	10.40	203.24	0.66	0.20	12.18
B-2	1.60	8.00	2.21	15.92	7.88	185.24	0.72	0.20	11.64
B-3	1.71	8.00	2.55	15.80	9.40	196.52	0.67	0.18	12.44
C-1	1.35	8.00	2.02	17.84	6.45	194.48	0.67	0.21	10.90
C-2	1.46	8.00	2.15	16.68	7.07	196.92	0.68	0.21	11.81
C-3	1.23	8.00	1.82	17.96	7.30	188.32	0.68	0.17	10.49
D-1	1.13	8.00	2.01	17.88	6.63	195.64	0.56	0.17	10.94
D-2	1.24	8.00	1.86	18.32	6.86	192.44	0.67	0.18	10.50
D-3	1.06	8.00	1.69	18.24	6.78	201.44	0.63	0.16	11.04

Figura 2.5. Resultados de carga, desplazamiento, relación de carga y factor de ductilidad de las muestras en laminación horizontal.

Fuente: Tjondro, Budianto, & Aryakusuma, 2011

No	P_a (kN)	δ_a (mm)	P_p (kN)	δ_p (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	P_a/P_p	P_a/P_u	μ_u
R-1	9.39	8.00	19.86	18.30	29.60	38.47	0.47	0.32	2.10
R-2	6.22	8.00	16.57	19.80	24.40	38.50	0.38	0.25	1.94
R-3	9.57	8.00	20.60	17.40	33.94	36.20	0.46	0.28	2.08
B-1	9.08	8.00	21.33	18.00	33.02	35.67	0.43	0.27	1.98
B-2	7.76	8.00	17.50	18.17	27.59	44.10	0.44	0.28	2.43
B-3	8.78	8.00	17.65	18.17	24.91	37.00	0.50	0.35	2.04
I-1	7.82	8.00	15.51	15.07	30.00	44.13	0.50	0.26	2.93
I-2	9.20	8.00	15.66	14.57	24.56	32.83	0.59	0.37	2.25
I-3	8.32	8.00	14.12	14.90	23.28	39.00	0.59	0.36	2.62

Figura 2.6 Resultados de carga, desplazamiento, relación de carga y factor de ductilidad de las muestras en laminación vertical

Fuente: Tjondro, Budianto, & Aryakusuma, 2011

Para la laminación horizontal la curva de carga-desplazamiento mostró un resultado similar en cada variación de espaciamiento de clavos. El modo de falla se debió principalmente a la flexión y el deslizamiento ocurrido entre la lámina debido a la interacción entre la madera y el clavo en la transferencia cortante entre la lámina. La falla ocurrió alrededor de un desplazamiento de 200mm.

La relación P_a / P_p fue como máximo de 0,76 lo que indica que la viga todavía estaba en el rango elástico para el desplazamiento permitido. La relación P_a / P_u fue entre 0,16-0,29 lo que muestra que las vigas en laminación horizontal están siendo cargadas un nivel significativamente inferior a su capacidad última. El factor de ductilidad de desplazamiento $\mu_u = \frac{\delta_u}{\delta_p}$ fue de alrededor de 11,0 esto significa que el desplazamiento último es aproximadamente 11 veces mayor que el desplazamiento permitido.

Para la laminación vertical la curva de carga-desplazamiento en el rango elástico mostró un resultado bastante similar en todas las vigas con sección transversal diferente. El modo de falla de las vigas rectangular y cajón se debió principalmente a la flexión. La falla ocurrió alrededor de un desplazamiento de 30mm.

La relación P_a / P_p fue alrededor de 0,6, que significa que, con el desplazamiento permitido, la viga todavía se encuentra en el rango elástico. La relación P_a / P_u fue entre 0,26-0,37 y señala que la

capacidad de flexión está más cerca del límite elástico que en la viga laminada con laminación horizontal. El factor de ductilidad de desplazamiento fue alrededor de 2,0-2,6, esto indica que la ductilidad de las vigas verticales fue menor que la ductilidad de la viga horizontal.

De acuerdo con los resultados, la viga laminada clavada con laminación vertical tiene mayor resistencia y rigidez que la viga laminada clavada con laminación horizontal, pero menos ductilidad. (Tjondro, Budianto, & Aryakusuma, 2011)

2.9 Investigación sobre modelación de vigas laminadas clavadas con laminación horizontal

Se realizó una investigación sobre la modelación de vigas laminadas clavadas con laminación horizontal para verificar un método de análisis de elementos finitos. Se construyeron y cargaron 20 vigas de madera en forma de I para evaluar su resistencia a la flexión. La mitad de estas vigas se ensamblaron utilizando patrones de clavado 2/4 y la otra mitad con patrón de clavado 4/4 (ambos en pulgadas). La figura 2.7 a) y b) muestra los patrones de clavado 2/4 y 4/4 respectivamente.

El primer dígito en el número del patrón 2/4 es el espaciamiento (51mm) de los clavos, desde los extremos de la viga a 965mm. El segundo dígito en el patrón 2/4 es el espaciamiento (102mm) entre los clavos en la parte central de la viga.

Para el patrón 4/4 tanto en los extremos como la parte central de la viga se utiliza un espaciamiento entre clavos de 102mm. (Bohnhoff et al., 1992).

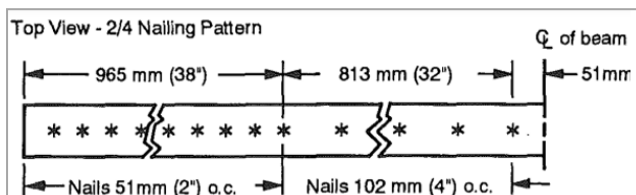


Figura 2.7 a) Patrón de clavado 2/4
Fuente: Bohnhoff et al., 1992

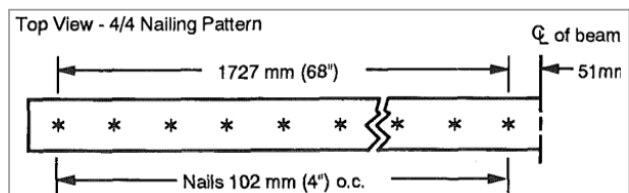


Figura 2.7 b) Patrón de clavado 4/4
Fuente: Bohnhoff et al., 1992

Se calcularon los desplazamientos de las vigas, las fuerzas de los clavos y las tensiones de la madera para cada una de las 20 vigas utilizando “*MLBeam*”, que fue un programa desarrollado para tales efectos. La figura 2.8 muestra las deflexiones medias previstas analíticamente y las deflexiones medias determinadas experimentalmente en el centro del vano frente a la carga total, para ambos patrones de clavado. La figura 2.9 muestra el deslizamiento de capa intermedia medio previsto analíticamente y el determinado experimentalmente frente a la carga total. Para ambas figuras, el rango representa ± 1 desviación estándar de 10 especímenes de prueba. Ambas figuras ilustran el comportamiento no lineal de los ensamblajes clavados y el efecto significativo que tiene el aumento del patrón de clavado en la rigidez de la viga.

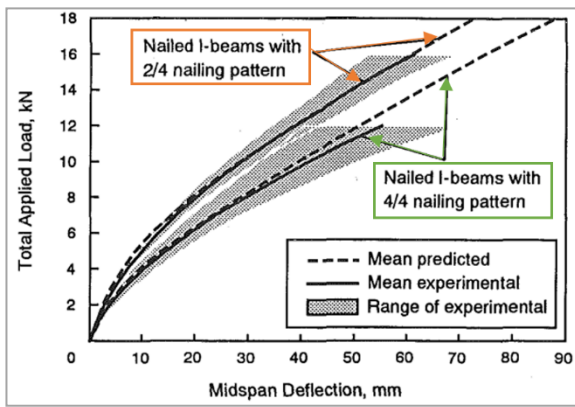


Figura 2.8 Deflexiones para los patrones de clavado 2/4 y 4/4

Fuente: Bohnhoff et al., 1992

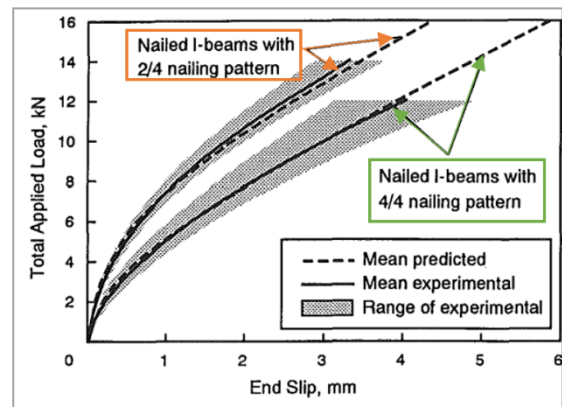


Figura 2.9 Deslizamiento para los patrones de clavado 2/4 y 4/4

Fuente: Bohnhoff et al., 1992

2.10 Conclusiones

En el capítulo se mostraron los principales conceptos para entender el comportamiento de las uniones clavadas. En las curvas carga-deformación de uniones se observa un deslizamiento inicial, seguido de un comportamiento lineal para deslizamientos pequeños. Sin embargo, a medida que la carga aumenta, la rigidez de la conexión disminuye y el comportamiento en todo el rango de carga se vuelve no lineal.

Se estudió la relación entre las vigas laminadas clavadas y la deformación de la conexión, teniendo que esta impacta significativamente en la rigidez de la viga y la distribución de fuerzas internas. Para medir esta influencia, se necesita comprender el comportamiento mecánico de la conexión, que se expresa a través de su relación carga-deslizamiento no lineal. En el rango elástico lineal, la carga y el deslizamiento están vinculados por el módulo de deslizamiento o módulo de corrimiento.

Se mencionaron investigaciones que permiten entender la diferencia entre vigas laminadas clavadas con laminación vertical y horizontal. En comparación, las primeras son más resistentes y rígidas que las vigas que tienen laminación horizontal, aunque sacrifican algo de ductilidad. También se estableció que el factor de rigidez de las vigas con laminación horizontal está condicionado por el espaciamiento de los clavos.

Adicionalmente se presentó un estudio de vigas con laminación horizontal donde se incorporan 2 patrones de clavado, los resultados muestran las diferencias en las deflexiones y deformaciones según el espaciamiento. Se observa que en vigas fabricadas con un patrón de clavado a menor espaciamiento presentan mayor rigidez en comparación de las vigas con mayor espaciamiento.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

Este capítulo se centra en varios aspectos clave. Primero, se describen los materiales y equipos utilizados para los ensayos de laboratorio. Luego, se explica la metodología utilizada en cada tipo de ensayo. Finalmente, se mencionan los métodos de análisis aplicados a los datos de los ensayos para lograr la evaluación de los resultados obtenidos.

3.2 Equipos y Materiales

Las escuadrías para las probetas utilizadas en los ensayos de unión fueron 41x185mm cepilladas y se obtuvieron de los aserraderos que abastecen el mercado nacional. Las escuadrías para cada una de las probetas utilizadas en los ensayos de vigas fueron 41x182mm cepilladas. Las piezas corresponden a pino radiata grado G1 y mejor. El contenido de humedad es del 12% y la densidad aparente promedio de 475 kg/m³

A continuación, se detallan las dimensiones y cantidad de piezas utilizadas para fabricar cada probeta para los ensayos a tracción, compresión y para las vigas laminadas clavadas. En la fabricación de las probetas con uniones clavadas y los elementos laminados se utilizaron clavos de largo 75 mm, y diámetro Ø2.8mm, con tensión de fluencia de 733,6 MPa (según punto 9.6.2.3 NCh1198). Su hincado se realizó con pistola neumática sin considerar perforación previa al clavado. (INFOR, 2022)

3.2.1 Piezas Probetas Ensayos a Tracción

La probeta se compone de cuatro piezas de madera de 355 mm de largo, dos centrales y dos laterales, cada componente lateral se conecta a ambas piezas centrales mediante la utilización de ocho clavos, distribuidos equitativamente en la parte superior e inferior. La figura 3.1 muestra el esquema de las probetas a tracción paralela.

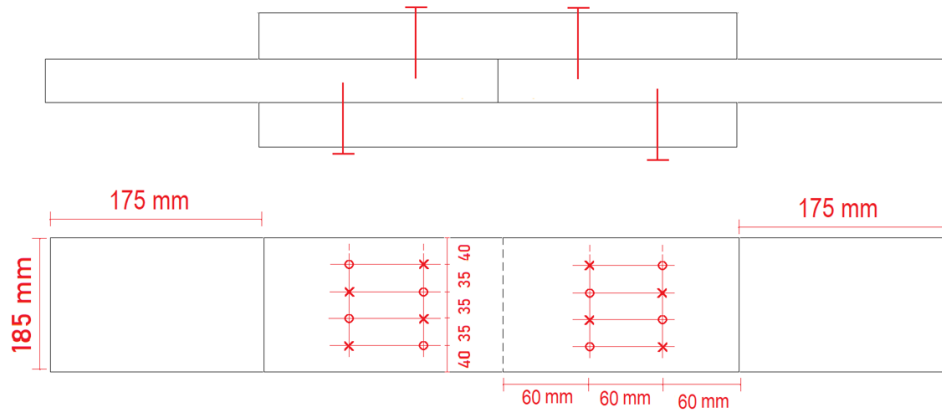


Figura 3.1 Probeta Ensayo a Tracción Paralela.
 Vista lateral de la probeta y vista desde el frente de la probeta respectivamente.
 Fuente: INFOR

3.2.2 Piezas Probetas Ensayos a Compresión Perpendicular

La probeta se compone de tres piezas, una piezas lateral en dirección horizontal de largo 400 mm y dos piezas centrales perpendicular a las piezas laterales de 290 mm de largo. Cada pieza lateral se encuentra unida a la pieza central por cuatro clavos, teniendo un total de ocho clavos en la probeta. La figura 3.2 muestra el esquema de las probetas a compresión perpendicular.

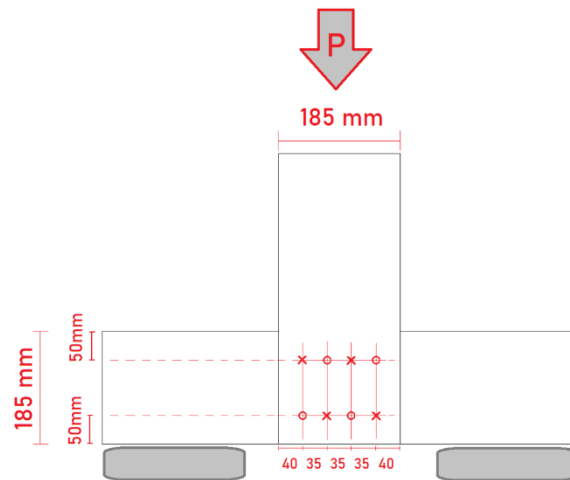


Figura 3.2 Probeta Ensayo a Compresión Perpendicular
 Fuente: INFOR

3.2.3 Piezas Probetas Ensayos de vigas.

Para la realización del estudio, se elaboraron vigas laminadas clavadas con empalme y sin empalmes o continuas. Las probetas continuas o sin empalme, se conforman por cinco piezas de 4 metros de largo, como muestra la figura 3.3. Las probetas con empalme consideraron largos de 1 m, 2 m, 3 m y

4 m distribuidas como muestra la figura 3.4. Los elementos laminados clavados consideraron un patrón de clavado en dos filas separadas a 85 mm, con 50 mm de distancia al borde cargado y 20 mm al borde descargado, la separación entre clavos es de 120mm la figura 3.3 muestra el patrón de clavado en láminas consecutivas. Se realizaron cinco probetas de viga tipo continua (Figura 3.4) y cinco tipos de viga con empalme (Figura 3.5). (INFOR, 2022)

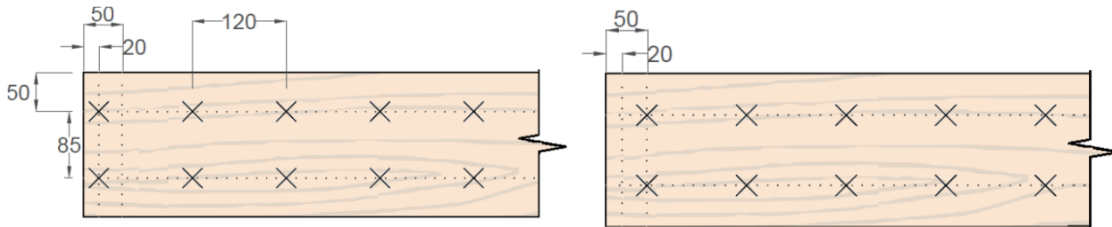


Figura 3.3. Patrón de clavado en láminas consecutivas.

Fuente: INFOR



Figura 3.4 Probeta Viga continua.

Fuente: INFOR



Figura 3.5 Probeta Viga con empalme.

Fuente: INFOR

3.2.4 Clavos

En la fabricación de las probetas con uniones clavadas y los elementos laminados se utilizaron clavos de 3” (75 mm, Ø2.8mm).

3.2.5 Pistola Neumática

El hincado de los clavos para la fabricación de las probetas con uniones clavadas y los elementos laminados se realizó con un compresor de aire que incluye pistola neumática.



Figura 3.6. Compresor de aire marca INDURA

Fuente: <https://toolmania.cl>

3.2.6 Medidor de humedad

Para el registro de humedad de las probetas utilizadas en cada ensayo se utiliza un xilohigrómetro portátil L610. La figura 3.7 muestra el medidor de humedad utilizado.



Figura 3.7 Medidor de humedad.

Fuente: Catálogo ProdTech

3.2.7 Balanza digital

Para registrar el peso de las probetas se utilizó una balanza digital. La figura 3.8 muestra una balanza de referencia.



Figura 3.8 Balanza digital

Fuente: BalanzaDirect.com

3.2.8 Máquina para ensayos de uniones

Para realizar los ensayos a tracción y compresión, se utiliza la máquina de ensayos universales, de la marca alemana ZwickRoell modelo Prolina Z100. La figura 3.9 muestra la máquina de ensayos universal.



Figura 3.9 Máquina de ensayos universal ZwickRoell ProLine Z100

Fuente: www.zwickRoell.com

3.2.9 Máquina para ensayos de vigas

Para realizar los ensayos a flexión en vigas se utiliza una máquina de ensayos universal con dos apoyos y dos lugares de aplicación de carga. La figura 3.10 muestra la máquina de ensayos universal utilizada para los ensayos a flexión.

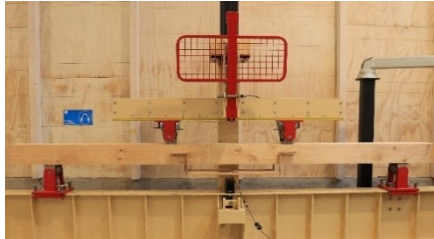


Figura 3.10 Máquina de ensayos a flexión

Fuente: INFOR

3.3 Realización de Ensayos de Uniones Clavadas

Los ensayos de uniones fueron del tipo cíclico y se ejecutaron bajo la normativa EN 26891;1991. El procedimiento de carga se muestra en la figura 3.11.

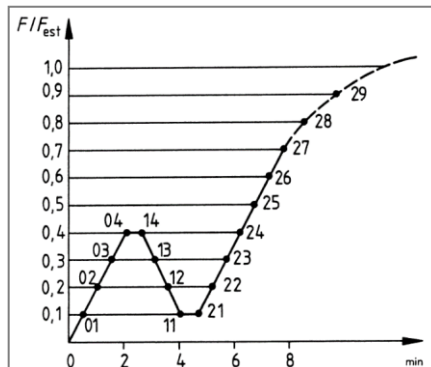


Figura 3.11 Procedimiento de carga teórico.

Fuente: EN 26891;1991

Al comienzo la carga se aplica gradualmente hasta alcanzar el 40% de la carga estimada (Fest) y se mantiene constante durante 30 segundos. Luego la carga se reduce al 10% de Fest y se mantiene durante 30 segundos. Finalmente, en una segunda fase la carga se incrementa gradualmente hasta alcanzar la carga última o hasta que se produzca un deslizamiento de 15 mm.

3.3.1 Ensayos a tracción paralela

A un empalme conformado por cuatro piezas. Se le aplica una fuerza de tracción en las piezas centrales. La tracción va en la dirección paralela a las fibras de la madera. La figura 3.12 muestra el esquema del ensayo y la figura 3.13 muestra la realización del ensayo a tracción. La máquina de ensayos universal registra la carga de tracción aplicada y la separación entre ambas piezas centrales de la probeta.

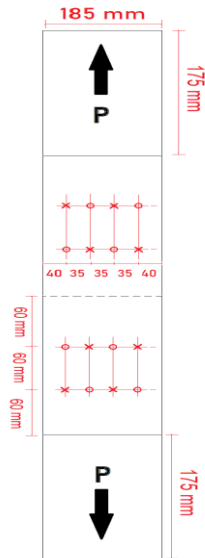


Figura 3.12 Esquema de ensayo tracción paralela en uniones clavadas.

Fuente: INFOR

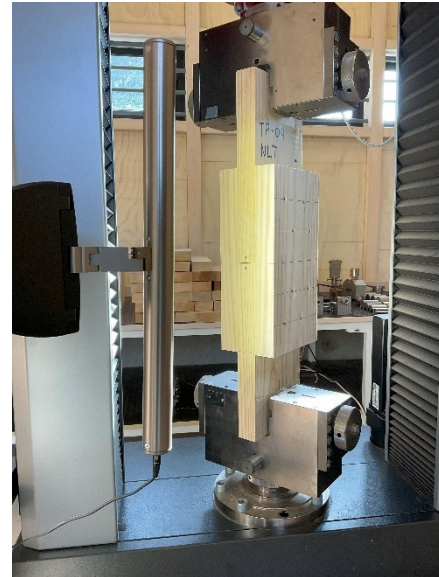


Figura 3.13 Implementación ensayo de tracción paralela en uniones clavadas

Fuente: INFOR

3.3.2 Ensayos a compresión perpendicular

Al empalme conformado por tres piezas se le aplica una fuerza de compresión en los maderos centrales. La compresión va en la dirección perpendicular a las fibras de los maderos laterales. La figura 3.14 muestra el esquema de ensayo y la figura 3.15 muestra la realización del ensayo a compresión. La máquina de ensayos universal registra la carga de compresión aplicada en las piezas centrales y la deformación al descender las piezas centrales.

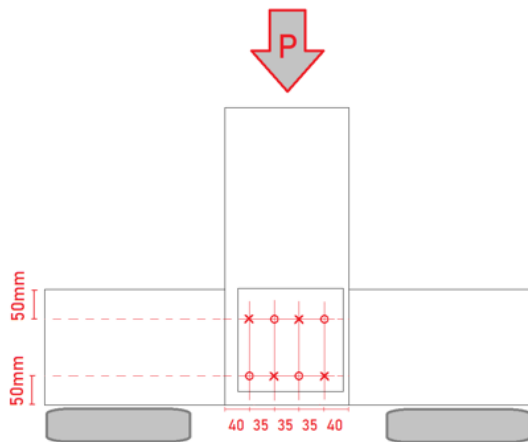


Figura 3.14 Esquema de ensayo compresión en uniones clavadas.

Fuente: INFOR



Figura 3.15 Implementación ensayo de compresión en uniones clavadas.

Fuente: INFOR

3.4 Obtención de Propiedades físicas de las probetas de ensayo de uniones.

Para conocer el contenido de humedad (CH%) y la densidad aparente promedio de las piezas, se tomaron medidas de sus dimensiones y su peso. Los registros se encuentran en la tablas A1.2.1 Y A1.2.2 de anexos.

Para determinar el peso de cada probeta sin considerar los clavos, se registra el peso total de la probeta y se resta el peso de los clavos utilizados. Teniendo en cuenta las dimensiones de las piezas y el peso estimado, se determina la densidad de la madera utilizada en las probetas. La densidad aparente promedio obtenida para los ensayos es de 475kg/m³.

Tanto para las probetas de tracción y compresión, se mide el CH% de cada pieza que la compone, y se saca un promedio que representa el CH% de toda probeta. El contenido de humedad promedio es aproximadamente 12% lo que indica que las probetas se encuentran en un estado seco.

3.5 Ajuste en deformaciones de curvas a tracción.

Considerando el método de ejecución del ensayo, los datos en bruto del ensayo entregan la deformación en direcciones opuestas desde el centro de la probeta (figura 3.16), lo que da lugar a una curva de Carga vs Deformación (2Δ) que refleja la deformación de los clavos en ambas direcciones con respecto al centro de la probeta.

Para cuantificar el desplazamiento (Δ) de los clavos en una sola dirección con relación al centro de la probeta se realiza un ajuste a los datos registrados, se debe dividir a la mitad las deformaciones (2Δ) registradas originalmente. Cabe señalar que únicamente la deformación se divide a la mitad, ya que la carga registrada representa la tracción "T" para ambas direcciones en la probeta. La figura 3.17, muestra la representación de la deformación medida en una dirección para el ensayo a tracción.

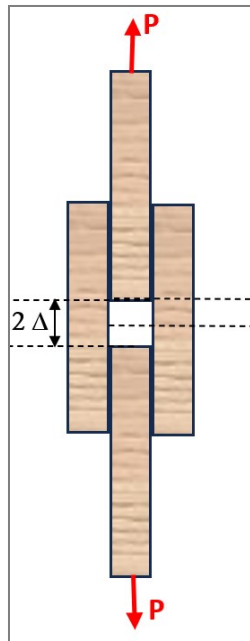


Figura 3.16 Deformación medida en ambas direcciones ensayo a tracción.

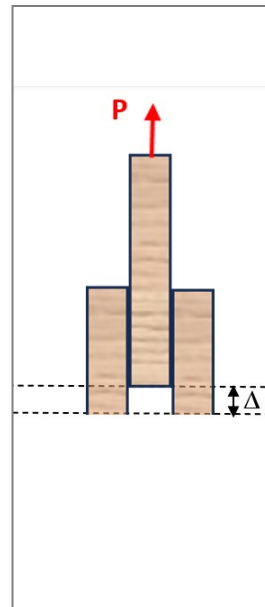


Figura 3.17 Deformación en una dirección ensayo a tracción.

3.6 Obtención de Acomodo inicial curvas

En general, todos los tipos de uniones de madera exhiben una parte de deslizamiento inicial, (Meghlat, Oudjene, Ait-Aider, & Batoz, 2013). Este deslizamiento inicial, se considera un acomodo inicial, el cual se estimó según lo señalado en anexo 1.3

3.7 Puntos de interés y cálculos según norma EN26891

A partir de las mediciones registradas en uniones, se obtienen los puntos que muestra la figura 3.18, para realizar los cálculos del apartado 8.5 de la norma EN 26891, que se muestran en el anexo 1.4. Para obtener los puntos de interés, se utiliza el código Matlab de la figura 1.9.2 de anexos.

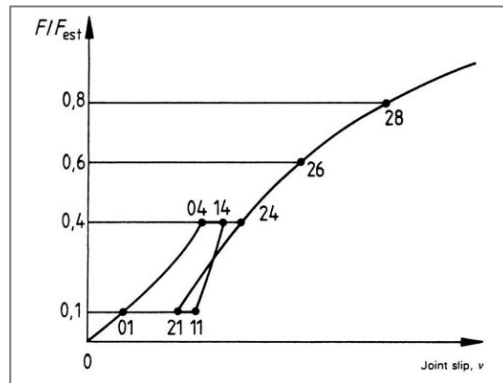


Figura 3.18 Curva de carga-deformación idealizada y puntos de interés
Fuente: EN26891

3.8 Pendientes en las fases de carga

Ya obtenidos los puntos indicados en la norma, se estiman las pendientes k_1 y k_2 . La pendiente k_1 que se muestra en la figura 3.19 representa cómo cambia la carga con respecto a la deformación durante la primera fase del ensayo. La pendiente k_2 que se muestra en la figura 3.20 representa cómo cambia la carga con respecto a la deformación en la fase de incremento hasta la carga última.

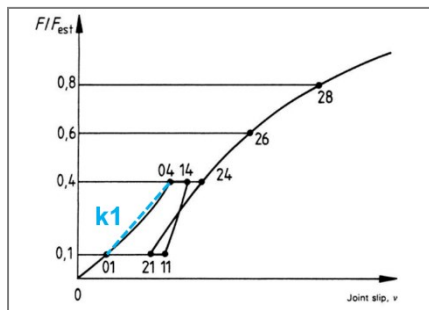


Figura 3.19 Pendiente carga inicial

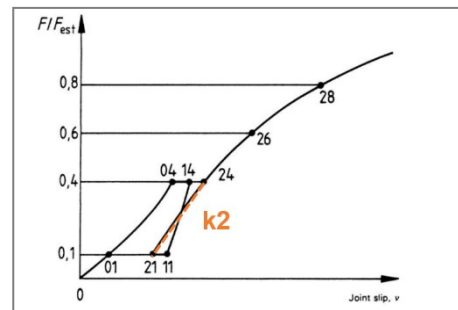


Figura 3.20 Pendiente en la segunda fase carga

k_1 : Pendiente carga inicial.
 p_{01} : Deformación a 10% de la F_{est}
 p_{04} : Deformación a 40% de la F_{est}

k_2 : Pendiente en la segunda fase de carga
 p_{21} : Deformación a 10% de la F_{est} en la segunda fase de carga
 p_{24} : Deformación a 40% de la F_{est} en la segunda fase de carga

3.9 Deformaciones remanentes

La deformación remanente (Δr) en el contexto del ensayo de carga y descarga se refiere a la deformación que permanece en el material después de haberse sometido a un ciclo de carga y descarga, puesto que, durante la fase de descarga del ensayo, la deformación disminuye, pero no regresa completamente a cero. Para estimar la deformación remanente, se utiliza la pendiente k_2 se proyecta para determinar su intersección con el eje Y. La figura 3.21, ilustra la deformación remanente señalada.

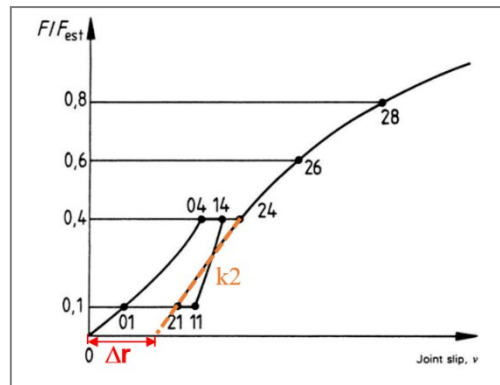


Figura 3.21 Deformación remanente (Δr)

3.10 Curvas carga-deformación promedio y desviación estándar de la curva promedio.

Con el propósito de adquirir una curva carga-deformación representativa en los ensayos de tracción y compresión, se estimó una curva promedio para cada tipo de ensayo, la cual se obtuvo mediante el promedio de las cargas de cada curva en intervalos de 0.1 mm.

Adicionalmente se estima la desviación estándar de la carga que conforma la curva promedio, luego se grafican dos curvas con respecto a la curva promedio: la curva promedio sumando la desviación estándar, y la curva promedio restando la desviación estándar. Las figuras 1.9.1 y 1.9.3 de anexos muestran los códigos Matlab implementados para estimar el promedio, y la desviación estándar de la curva promedio, respectivamente

3.11 Curva Carga-Deformación Individual de un clavo

Para obtener la curva carga-deformación individual de un clavo, a partir de las curvas carga-deformación promedio estimadas considerando 8 clavos, se reparte la carga en los ocho clavos.

3.12 Módulo de deslizamiento según normativas

De acuerdo con la tabla 48 de la norma NCh 1198, el módulo de corrimiento en clavos solicitados a cizalle simple sin pretaladrado se determina de la siguiente forma:

$$C = \frac{5 \cdot P_{ad}}{d_c} \quad (3.13.1)$$

P_{ad} : Carga Admisible del Clavo (N)

d_c : diametro del clavo (mm)

De acuerdo con el punto 4.2 del Eurocódigo 5, el módulo de deslizamiento de los elementos de unión en uniones clavadas sin pretaladrado se define teóricamente de la siguiente forma:

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d^{0,8}}{30} \quad (3.13.2)$$

ρ_m : densidad media de la madera (kg/m^3), según EN338 (2010)

d : diametro del clavo (mm)

3.13 Realización de Ensayos de Vigas laminadas Clavadas

El esquema de ensayo utilizado y la velocidad de carga considerada son realizados de acuerdo con la norma EN 408, se realizaron ensayos para determinar la rigidez global y local de la viga. La figura 3.22 muestra el esquema de ensayo para rigidez global o absoluta, registrando la deformación entre los puntos de apoyo con un sensor láser dispuesto en la parte central inferior de la viga. La figura 3.23 muestra el esquema de ensayo para rigidez local, midiendo las deformaciones respecto al eje neutro de la viga.

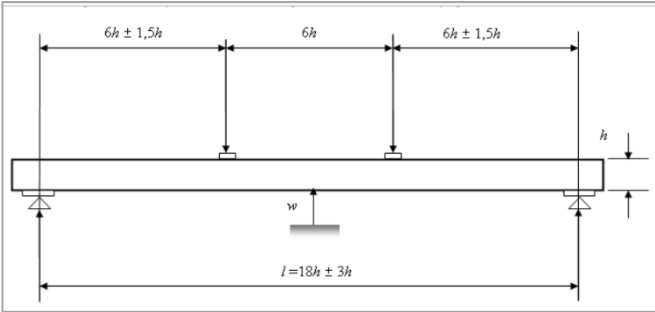


Figura 3.22 Esquema de ensayo para determinación de la rigidez global
Fuente: EN 408.

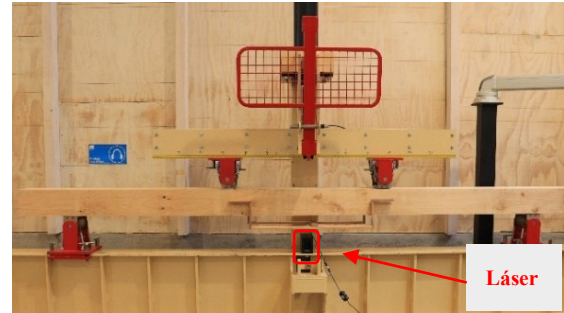


Figura 3.23 Implementación de ensayo para determinación de rigidez global

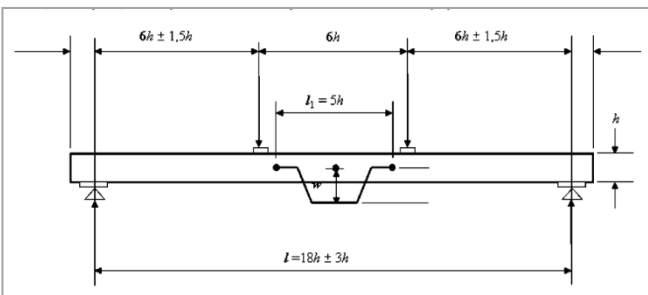


Figura 3.24 Esquema de ensayo para determinación de la rigidez local
Fuente: EN 408.

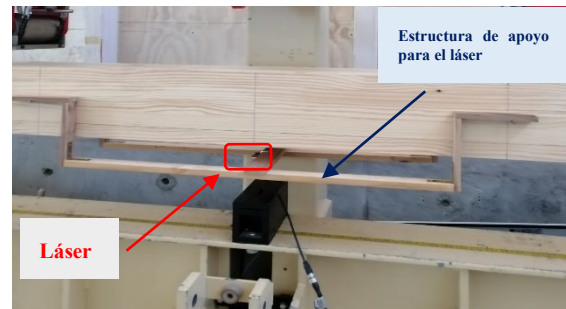


Figura 3.25 Implementación de ensayo para determinación de rigidez local
Fuente: INFOR

Para la realización de los ensayos, una misma viga, puede considerarse como viga en laminación vertical o como viga en laminación horizontal, dependiendo de la orientación en la que se ubique la viga para realizar el ensayo. La figura 3.26, muestra una viga en laminación vertical, y la figura 3.27 muestra una viga en laminación horizontal. Luego de realizadas las mediciones de deformación mencionadas, se lleva la viga en laminación vertical a la rotura, para obtener la fuerza máxima alcanzada. En el caso de la viga laminada horizontalmente no se alcanza la falla pero se llega a grandes deformaciones.



Figura 3.26 Viga en laminación vertical.



Figura 3.27 Viga en laminación horizontal

3.14 Determinación del módulo de elasticidad local y global en flexión.

El módulo de elasticidad local se calcula de acuerdo con el punto 9.3 de la norma EN408-2012. El módulo de elasticidad global se calcula de acuerdo con el punto 10.3 de la norma EN408-2012. Ambos se expresan en (N/mm^2), el punto 1.8 de anexos muestra los cálculos según la norma señalada.

3.15 Conclusiones

Este capítulo ha proporcionado en detalle los materiales utilizados y la metodología empleada en los ensayos. Asimismo, se han presentado las metodologías utilizadas en el análisis de datos y los cálculos realizados. Por otro lado, se presentan los métodos de obtención del módulo de corrimiento de acuerdo con normativas. En resumen, este capítulo establece las bases para la obtención, análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Introducción

En el presente capítulo, se exponen los resultados de los ensayos de uniones, acompañados de un análisis de estadística descriptiva correspondiente. Este análisis posibilita una apreciación más rigurosa de las tendencias y variabilidades inherentes a los resultados. Adicionalmente, se efectúa una comparativa entre los resultados de los ensayos de tracción y compresión.

En una segunda parte, se exponen los resultados de los ensayos de vigas, donde se realiza un análisis entre la diferencia de vigas continuas y vigas con empalmes, igualmente se analiza la diferencia de resultados dependiendo de la laminación vertical y la laminación horizontal en la viga.

4.2 Análisis y resultados de Ensayos de Uniones

4.2.1 Propiedades físicas

La tabla 4.1 presenta un resumen del análisis estadístico de los resultados obtenidos para la densidad y humedad. Para ambos ensayos el contenido de humedad promedio es aproximadamente del 12%, lo que indica que las probetas se encuentran en un estado seco. Una desviación estándar baja y un coeficiente de variación (CV) menor al 12%, indican que los valores no varían significativamente en relación con el promedio.

Respecto a la densidad, esta tiene un promedio de aproximadamente 475 kg/m³ para ambos ensayos, su desviación estándar es pequeña, siendo considerablemente menor al valor promedio de los datos, lo que indica que la mayoría de los valores en el conjunto de datos están muy cerca del valor promedio.

Tabla 4.1. Resumen Análisis Estadístico de las propiedades físicas.

	Probetas Tracción		Probetas Compresión	
	Densidad (kg/m ³)	CH (%)	Densidad (kg/m ³)	CH (%)
Promedio	476,08	11,71	475,76	11,47
Desviación Estándar	24,43	0,50	32,18	0,97
CV	5%	4%	6,8%	8,5%

4.2.2 Acomodo inicial curvas

A continuación, en la Tabla 4.2, se presenta el análisis estadístico de los acomodos de las curvas a compresión, donde se incluyen el promedio, la desviación estándar, el valor mínimo y el valor máximo. La figura 2.1 en el capítulo 2 del documento ilustra el efecto de acomodo inicial.

Tabla 4.2 Análisis Estadístico de Acomodos en Curvas a Compresión

Probetas Compresión	Acomodo (mm)
Promedio	0,30
Desviación Estándar	0,41
valor mínimo	0,00
valor máximo	1,76

Los datos muestran que el acomodo de las curvas tiene un promedio de 0,30 mm, el rango de valores va desde 0 mm hasta 1.76 mm, lo que indica que algunas curvas no presentan acomodo inicial. Una desviación estándar de 0,41 mm sugiere una variabilidad moderada en los valores de acomodo inicial de las curvas.

4.2.3 Puntos de interés norma EN26891

La tabla 4.3 muestra la estadística descriptiva de los puntos de interés que se muestran en la figura 3.18, los cuales fueron estimados para los ensayos a tracción considerando la carga-deformación en 8 clavos. En la figura 3.28 se pueden ver los puntos obtenidos para una curva.

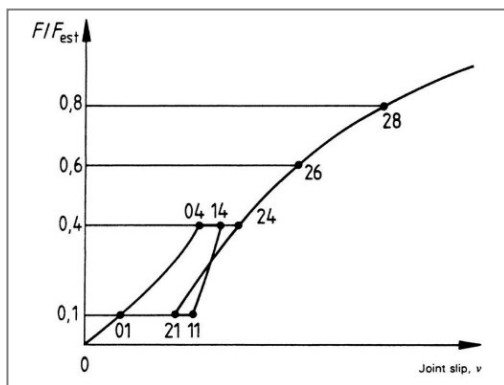


Figura 4.1 Curva de carga-deformación idealizada y puntos de interés
Fuente: EN26891

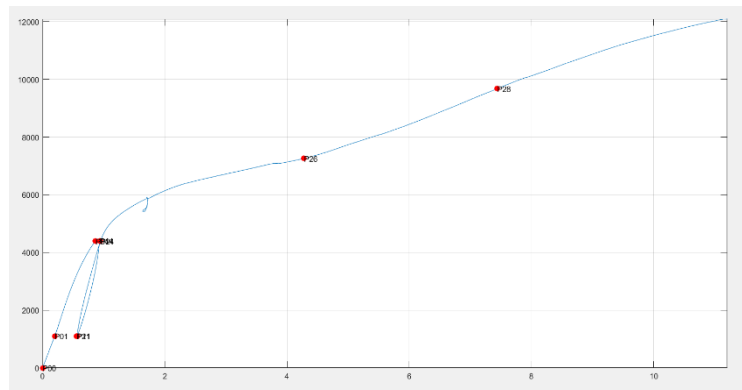


Figura 4.1 Puntos de interés obtenidos en Matlab para una curva real.
Fuente: EN26891

Tabla 4.3 Estadística descriptiva de los puntos de interés ensayo tracción

	Deformación de los puntos de interés ensayo Tracción (mm)							
	v01	v04	v14	v11	v21	v24	v26	v28
Promedio	0,27	1,09	1,17	0,92	0,92	1,18	3,10	7,74
Desviación Estándar	0,10	0,19	0,22	0,22	0,22	0,23	0,94	4,42
Rango	0,49	0,83	1,07	1,03	1,03	1,10	3,41	20,44
valor mínimo	0,12	0,79	0,82	0,60	0,58	0,82	1,43	3,51
valor máximo	0,61	1,62	1,89	1,63	1,61	1,92	4,84	23,95
CV	38,6%	17,5%	18,8%	24,0%	24,4%	19,1%	30,5%	57,1%

El punto v01 tiene el rango menos amplio de deformación, con un valor de 0,49 mm, lo que sugiere que las mediciones de deformación en este punto no varían considerablemente. El punto v04 muestra la menor variabilidad relativa y un rango más estrecho en las mediciones de deformación. Esto lo convierte en un punto de referencia más consistente en comparación con otros puntos. Se puede observar que el punto v28 muestra la mayor variabilidad en las mediciones de deformación en comparación con los demás puntos, siendo el punto v28 el menos consistente

La tabla 4.4 muestra la estadística descriptiva de los puntos de interés señalados anteriormente, los cuales fueron estimados para los ensayos a compresión considerando la carga-deformación en 8 clavos.

Tabla 4.4 Estadística descriptiva de los puntos de interés ensayo compresión

	Deformación de los puntos de interés ensayo Compresión (mm)							
	v01	v04	v14	v11	v21	v24	v26	v28
Promedio	0,25	1,34	1,50	0,99	0,98	1,52	3,72	9,18
Desviación Estándar	0,04	0,30	0,37	0,32	0,32	0,37	0,81	2,95
Rango	0,18	1,14	1,40	1,29	1,29	1,44	3,44	10,76
valor mínimo	0,20	0,98	1,05	0,61	0,59	1,06	2,11	6,98
valor máximo	0,38	2,11	2,45	1,90	1,88	2,50	5,55	17,74
CV	17,6%	22,1%	24,3%	32,1%	32,4%	24,6%	21,8%	32,1%

El punto v01 presenta la desviación estándar más baja, con un valor de 0.04 mm. Esto indica que las mediciones de deformación en el punto v01 tienden a ser consistentes y cercanas al valor promedio. Entre los puntos v04 a v24 se muestra un bajo coeficiente de variación, y un rango estrecho en las mediciones de deformación, siendo puntos de referencia consistentes. El punto v28 tiene el rango más

amplio de deformación, con un valor de 10.76 mm, lo que sugiere que las mediciones de deformación en este punto pueden variar considerablemente.

4.2.3.1 Comparación de los Puntos de interés en tracción y compresión

Tanto en tracción como en compresión, los puntos más alejados tienden a mostrar una mayor variabilidad en las mediciones, en cambio los puntos más cercanos como v01, tienden a mostrar una menor variabilidad relativa, esto los convierte en puntos de referencia más consistentes en comparación con los puntos más alejados.

4.2.4 Cálculos según norma EN26891

A continuación, en la tabla 4.5 se presenta la estadística descriptiva de los cálculos de interés realizados para los ensayos a tracción, dichos cálculos se realizan de acuerdo con el anexo 1.4, donde se definen las ecuaciones a partir de los puntos de interés (figura 3.18) anteriormente estimados, dichos puntos se obtienen de la curva carga-deformación de la unión que representan los 8 clavos.

Tabla 4.5 Estadística descriptiva cálculos norma EN26891 ensayos a tracción

Curvas Tracción	Deslizamiento inicial: Vi (mm)	Deslizamiento inicial modificado: Vi, mod(mm)	Asentamiento de la unión: Vs (mm)	Deslizamiento elástico: ve (mm)	Módulo de deslizamiento inicial: ki (N/mm)	Módulo de deslizamiento: ks (N/mm)
Promedio	1,09	1,10	0,00	0,34	4135,5	4129,7
Desviación Estándar	0,19	0,20	0,11	0,06	677,1	742,8
Rango	0,83	1,22	0,55	0,29	2857,8	4607,8
valor mínimo	0,79	0,63	-0,23	0,15	2711,1	2380,2
valor máximo	1,62	1,85	0,32	0,44	5568,9	6988,0

A continuación, en la tabla 4.6 se presenta la estadística descriptiva de los cálculos (ecuaciones en anexo 1.4) realizados para los ensayos a compresión, se trabaja con los puntos de interés que se obtienen de la curva carga-deformación de la unión que representan los ocho clavos.

Tabla 4.6 Estadística descriptiva cálculos norma EN26891 ensayos a compresión

Curvas compresión	Deslizamiento inicial: V_i (mm)	Deslizamiento inicial modificado: $V_i, \text{mod}(\text{mm})$	Asentamiento de la unión: V_s (mm)	Deslizamiento elástico: v_e (mm)	Módulo de deslizamiento inicial: k_i (N/mm)	Módulo de deslizamiento: k_s (N/mm)
Promedio	1,34	1,45	-0,12	0,70	3421,50	3181,05
Desviación Estándar	0,30	0,36	0,08	0,08	637,67	677,34
Rango	1,14	1,45	0,34	0,34	2422,04	2652,40
valor mínimo	0,98	0,99	-0,35	0,57	2083,23	1805,74
valor máximo	2,11	2,44	-0,01	0,91	4505,27	4458,13

Al comparar los resultados de ambos ensayos, es posible notar que en promedio tanto el módulo de deslizamiento inicial k_i , como el módulo de deslizamiento k_s , son mayores en el ensayo a tracción. Esto se podría atribuir que las piezas de la probeta en compresión experimentan un aplastamiento en su base algo mayor, pues se debe tener en cuenta que no se midió la deformación relativa entre clavos, sino la deformación del cabezal de la probeta.

4.2.5 Pendientes en las fases de carga

La tabla 4.7 muestra la estadística descriptiva para las pendientes k_1 de la fase de carga inicial y k_2 de la segunda fase de carga para los ensayos a tracción. Dichas pendientes son estimadas a partir de la curva carga-deformación de la unión de ocho clavos.

Tabla 4.7 Estadística Descriptiva para pendientes k_1 y k_2 de ensayos a tracción.

Curvas Tracción	k_1 (N/mm)	k_2 (N/mm)
Promedio	3948,35	11290,76
Desviación Estándar	1315,79	1780,31
Rango	7780,78	8066,62
valor mínimo	2147,01	8746,42
valor máximo	9927,79	16813,04
CV	33,3%	15,8%

En base a lo señalado en la tabla 4.7, para las curvas a tracción, el valor promedio de la pendiente k_1 es de aproximadamente 3948,3 N/mm. La desviación estándar de k_1 es de 1315,7 N/mm, lo que indica una dispersión moderada en los datos en torno al promedio. El rango es de 7780,78 N/mm, lo

que indica una significativa diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo en las pendientes k_1 de las curvas. El CV del 33,3% sugiere que la variabilidad en k_1 es relativamente alta en relación con la media.

El valor promedio de la pendiente k_2 en las curvas de tracción es de aproximadamente 11290,7 N/mm. La desviación estándar de k_2 es de 1780,31 N/mm, lo que indica una dispersión moderada en los datos en torno al promedio, el rango es de 8066,6 N/mm, lo que indica una significativa diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo en las pendientes k_2 de las curvas.

Al comparar las pendientes k_1 y k_2 , estas difieren significativamente en términos de sus promedios y rangos, k_2 tiene un promedio mucho mayor que k_1 , lo que indica una mayor rigidez en la segunda fase de carga. La desviación estándar de k_1 y k_2 indica una dispersión moderada en los datos en torno al promedio para ambas pendientes. Sin embargo, el CV de k_2 es significativamente más bajo, con un valor del 15,8%. Esto indica que la variabilidad en k_2 es menor en relación con la media en comparación con k_1 . Esto sugiere que k_2 es más consistente y predecible en sus valores en relación con su promedio en comparación con k_1 , que tiene una variabilidad relativa más alta.

La tabla 4.8 muestra la estadística descriptiva para las pendientes k_1 de la fase de carga inicial y k_2 de la segunda fase de carga para los ensayos a compresión. Dichas pendientes son estimadas a partir de la curva carga-deformación de la unión de ocho clavos.

Tabla 4.8 Estadística Descriptiva para pendientes k_1 y k_2 de ensayos a compresión.

Curvas Compresión	k_1 (N/mm)	k_2 (N/mm)
Promedio	3174,5	6122,0
Desviación Estándar	677,1	731,6
Rango	2652,5	2925,7
Valor mínimo	1802,9	4606,1
Valor máximo	4455,4	7531,8
CV	21,3%	11,9%

De acuerdo con lo señalado en la tabla 4.8, para los ensayos a compresión, el valor promedio de la pendiente k_1 es de aproximadamente 3174N/mm, la desviación estándar de 677N/mm sugiere una variabilidad moderada en los valores de k_1 . El rango de 2652N/mm muestra una variabilidad en las respuestas iniciales en las diferentes curvas de compresión.

El valor promedio de k_2 es de aproximadamente 6122 N/mm, la desviación estándar de 731N/mm sugiere una variabilidad moderada en los valores de k_2 , el rango de 2925 N/mm indica una variabilidad en las respuestas de incremento de carga en la segunda fase de carga para los ensayos a compresión.

Al igual que en las pendientes de tracción, k_2 es significativamente mayor que k_1 en compresión, esto sugiere que se muestra una mayor resistencia durante la fase del segundo incremento de carga en comparación con la fase de carga inicial, para los ensayos de uniones clavadas tanto en tracción como compresión. Esto podría indicar un aumento en la resistencia al deslizamiento para ciclos de carga posteriores, o que se requiere cierta deformación para activar la resistencia de los clavos.

4.2.6 Deformaciones remanentes

A continuación, en la Tabla 4.9, se presenta el análisis estadístico de las deformaciones remanentes calculadas para las curvas a tracción considerando la carga-deformación en ocho clavos.

Tabla 4.9 Estadística Descriptiva de deformaciones remanentes ensayos tracción

Curvas Tracción	Deformación Remanente (mm)
Promedio	0,80
Desviación Estándar	0,25
Rango	1,30
valor mínimo	0,21
valor máximo	1,51
CV	31,4%

En base a lo señalado en la tabla 4.9, en promedio, se observa una deformación remanente de 0,80 mm en las curvas de tracción. Una desviación estándar de 0,25 mm indica que los valores individuales de deformación remanente tienden a desviarse en promedio 0,25 mm de la media.

El rango para la deformación remanente es de 1,3 mm esto muestra la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo en las mediciones, lo que indica una variabilidad moderada de la deformación remanente. Un CV del 31,4% indica una variabilidad moderada en relación con el promedio,

A continuación, en la Tabla 4.10, se presenta el análisis estadístico de las deformaciones remanentes calculadas para las curvas a compresión considerando la carga-deformación en ocho clavos.

Tabla 4.10 Estadística Descriptiva de deformaciones remanentes ensayos compresión

Curvas Compresión	Deformación Remanente (mm)
Promedio	0,79
Desviación Estándar	0,30
Rango	1,23
Valor mínimo	0,44
Valor máximo	1,67
CV	37,5%

En base a lo señalado en la Tabla 4.10 el valor promedio de la deformación remanente en las curvas de compresión es de aproximadamente 0,79 mm. Una desviación estándar de 0,30 mm sugiere una variabilidad moderada en los valores de deformación remanente.

El rango para la deformación remanente es de 1,2 mm lo que indica una variabilidad moderada en esta característica. Un CV del 37.5% indica que la variabilidad relativa en relación con el promedio es relativamente alta en la deformación remanente.

4.2.6.1 Comparación Deformaciones remanentes ensayos a tracción y compresión.

Ambos ensayos tienen promedios muy similares con 0,80 mm para tracción y 0,79 mm para compresión, por tanto, en promedio la deformación remanente es casi la misma para ambos ensayos. Sin embargo, en las pruebas de compresión se tiende a mostrar una mayor dispersión de datos alrededor de la media, con un mayor valor de desviación estándar. El CV en las curvas de compresión (37,5%) es más alto que en las curvas de tracción (31,4%), lo que sugiere que la variabilidad en relación con la media es mayor en las pruebas de compresión.

4.2.7 Máximos de carga y deformación de la unión

En la Tabla 4.11 se presenta en forma de resumen, la estadística para los datos de deformación y carga máximas de las curvas carga-deformación para 8 clavos del ensayo a tracción.

Tabla 4.11 Estadística Descriptiva Máximos Curvas Tracción.

Probetas Tracción	Def máx. (mm)	Fmax (N)
Promedio	20,60	10606,52
Desviación Estándar	3,42	1324,28
Rango	14,12	7042,16
valor mínimo	12,54	6571,90
valor máximo	26,67	13614,06
CV	16,6%	12,5%

De la tabla se puede observar que el promedio de las deformaciones máximas alcanzadas en los ensayos a compresión es de aproximadamente 20 mm. Se tiene un rango de 0,1 mm lo que indica que la diferencia entre el valor mínimo y máximo es muy pequeña. La desviación estándar para la deformación máxima es muy baja, esto indica que los valores individuales son muy consistentes en relación con el promedio. Para la deformación máxima, el CV es extremadamente bajo, solo 0.2%. Esto sugiere que la variabilidad relativa en relación con el promedio es extremadamente baja.

La carga máxima promedio es de aproximadamente 10,3 kN. El rango es de aproximadamente 3 kN, lo que indica una relativa variabilidad en la carga máxima. La desviación estándar para la carga máxima es de aproximadamente 0,9 kN la cual, aunque resulta más alta que la desviación para la deformación máxima sigue siendo relativamente baja, lo que sugiere consistencia en los valores de carga máxima. Con un CV de 9,6% la carga máxima muestra una variabilidad moderada en relación con el promedio, pero en general sigue siendo relativamente consistente.

En la Tabla 4.12, se presenta en forma de resumen, la estadística para los datos de deformación y carga máximas de las curvas carga-deformación de 8 clavos del ensayo a compresión

Tabla 4.12 Estadística Descriptiva Máximos Curvas Compresión

Probetas Compresión	Def máx. (mm)	Fmáx (N)
Promedio	20,02	10307,01
Desviación Estándar	0,04	989,38
Rango	0,10	3074,64
Valor mínimo	20,00	8837,36
Valor máximo	20,10	11912,00
CV	0,2%	9,6%

De la tabla se puede observar que el promedio de las deformaciones máximas alcanzadas en los ensayos a compresión es de aproximadamente 20mm. Se tiene un rango de 0,1 mm lo que indica que la diferencia entre el valor mínimo y máximo es muy pequeña. La desviación estándar para la deformación máxima es muy baja, esto indica que los valores individuales son muy consistentes en relación con el promedio. Para la deformación máxima, el CV es extremadamente bajo, solo 0.2%. Esto sugiere que la variabilidad relativa en relación con el promedio es extremadamente baja.

La carga máxima promedio es de aproximadamente 10,3 kN. El rango es de aproximadamente 3 kN, lo que indica una relativa variabilidad en la carga máxima. La desviación estándar para la carga máxima es de aproximadamente 0,9 kN la cual, aunque resulta más alta que la desviación para la deformación máxima sigue siendo relativamente baja, lo que sugiere consistencia en los valores de carga máxima. Con un CV de 9,6% la carga máxima muestra una variabilidad moderada en relación con el promedio, pero en general sigue siendo relativamente consistente.

4.2.7.1 Comparación de deformación máxima entre ensayos tracción y compresión

El promedio de deformación máxima en las pruebas de tracción es ligeramente mayor que en las pruebas de compresión. El coeficiente de variación (CV) en las pruebas de tracción es significativamente mayor (16.6%) en comparación con el de las pruebas de compresión (0.2%), esto indica que las pruebas de tracción tienen una mayor variabilidad en la deformación máxima en comparación con las pruebas de compresión, donde la deformación máxima es más consistente y presenta una menor variabilidad.

4.2.7.2 Comparación de cargas máximas entre ensayos tracción y compresión:

El promedio de carga máxima en las pruebas de tracción es ligeramente mayor que en las pruebas de compresión. El coeficiente de variación (CV) en las pruebas de tracción es del 12.5%, mientras que en las pruebas de compresión es del 9.6%, esto indica que las pruebas de tracción tienen una mayor variabilidad en la carga máxima en comparación con las pruebas de compresión, donde la carga máxima es más consistente y presenta una menor variabilidad.

4.2.8 Curva Carga-Deformación Promedio de la unión

La figura 4.2 muestra una gran similitud en el comienzo de la curva promedio estimada para tracción y compresión, considerando la carga-deformación de 8 clavos. Se puede notar que la pendiente inicial, estimada a 1mm de deformación, para ambas curvas es bastante similar. La pendiente de la curva promedio a compresión es levemente mayor que la de la curva promedio a tracción.

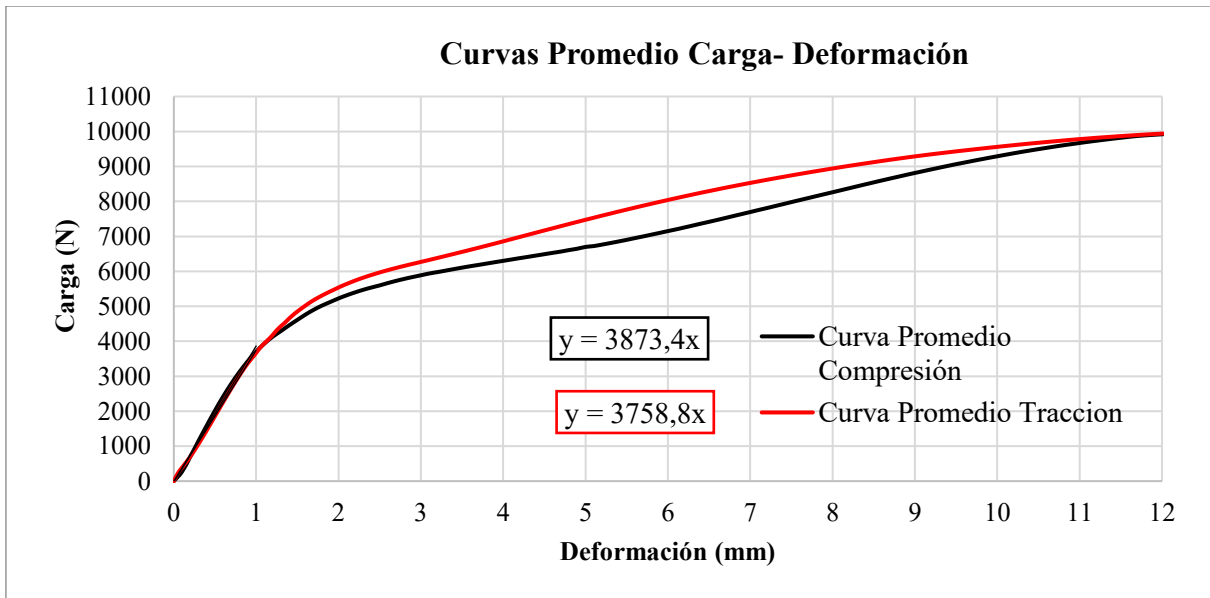


Figura 4.2 Curva Promedio de la unión a Tracción y Compresión.

Se observa una leve diferencia en el comportamiento inicial de las curvas, donde en comparación la pendiente de la curva promedio a compresión es mayor que la pendiente de la curva promedio a tracción. Este resultado difiere del resultado del apartado 4.2.5, en el cual las pendientes k_1 estimadas resultaban mayor en tracción que en compresión. La diferencia entre ambos análisis (4.28 y 4.2.5) del comportamiento inicial de las curvas se explica por el hecho de que la pendiente k_1 del análisis en 4.2.5 representa el promedio de las pendientes analizadas en cada una de las curvas individuales. En cambio la pendiente de la curva promedio mostrada en la figura 4.2 proporciona una aproximación, pues la curva promedio se conforma del promedio de la carga en cada milímetro de deformación, sin entregar precisión de la pendiente que tiene cada una de las curvas. En base a lo anterior, se considera que el análisis en 4.2.5 es más exacto.

En la figura 4.3 y 4.4 se tiene el grafico de la curva promedio junto con la curva promedio más la desviación estándar y menos la desviación estándar, para tracción y compresión respectivamente. En la figura 4.3 se puede notar que la curva promedio a tracción llega a 12mm, esto se debe a que producto de la mayor dispersión en las curvas a tracción, para el código Matlab utilizado se estimó el promedio hasta los 12 mm de deformación (la menor de las deformaciones de las curvas consideradas para el promedio), sin embargo esto no se debe confundir con que los ensayos a tracción no se hayan llevado a carga última.

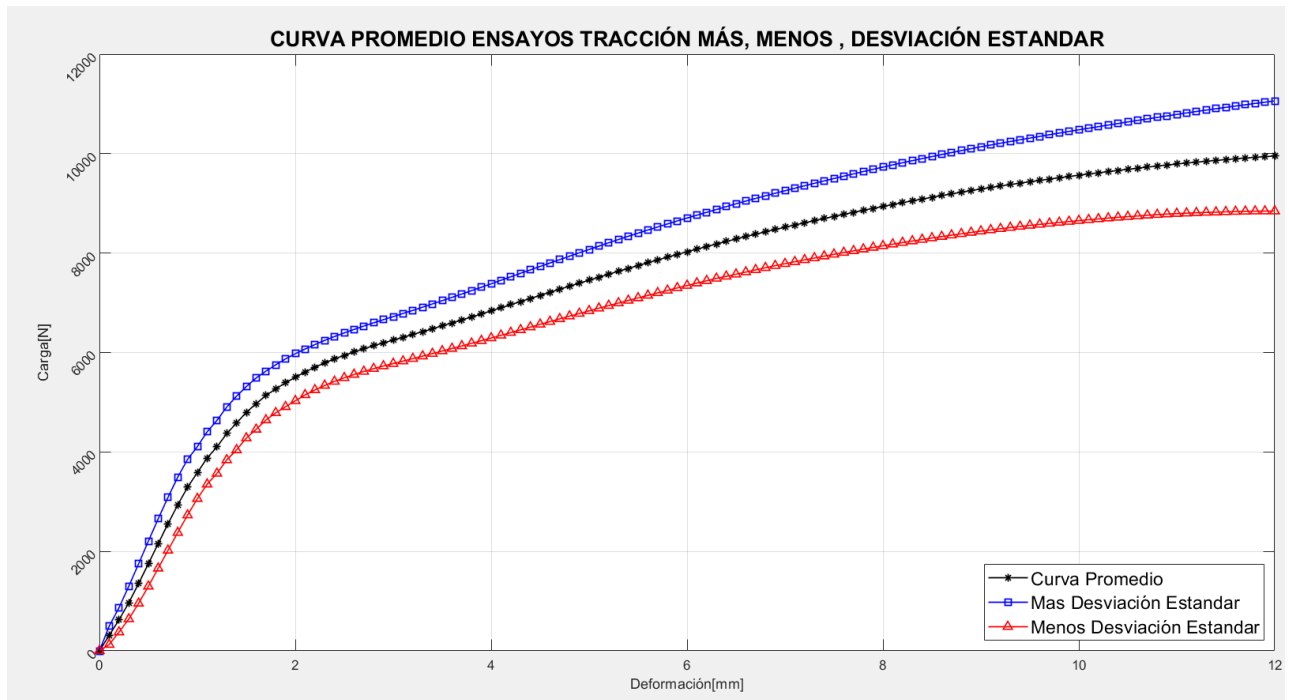


Figura 4.3 Curva Promedio Tracción, Curva promedio más desviación estándar, Curva Promedio menos Desviación estándar

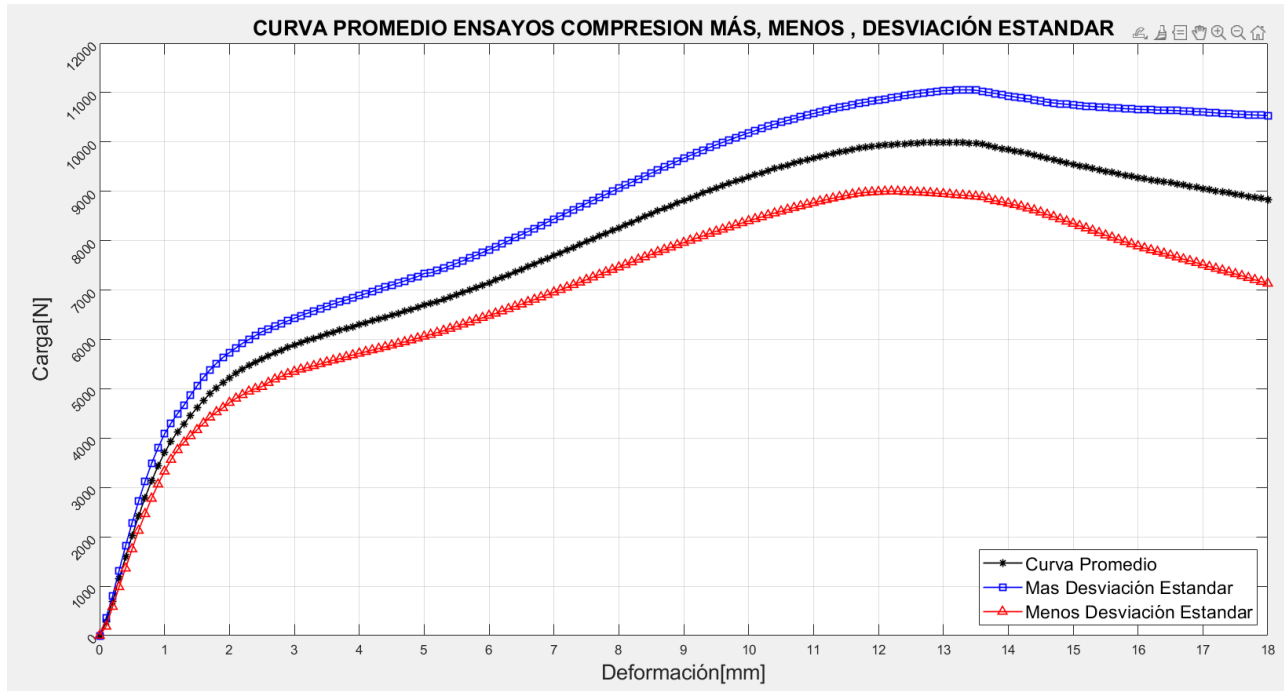


Figura 4.4 Curva Promedio Compresión, Curva promedio más desviación estándar, Curva Promedio menos Desviación estándar

Para ambos casos, se puede notar que, para menores deformaciones, hay una menor desviación estándar, y por ende los datos están más concentrados alrededor del promedio. Al aumentar la deformación, la desviación estándar también aumenta señalando que los datos están más dispersos.

4.2.9 Curva Carga-Deformación Individual de los Clavos

La figura 4.5 muestra las curvas carga-deformación individual de los clavos en tracción y compresión. La curva individual se obtiene al dividir la fuerza en los ocho clavos de la unión. De la figura se puede notar que la pendiente inicial de ambas curvas es similar, siendo la pendiente de los clavos a compresión ligeramente mayor, pues estas curvas dependen de la estimación de la curva promedio señalada en el apartado 4.2.8. Las pendientes mostradas en la figura 4.5 representan una aproximación del módulo de corrimiento de un solo clavo.

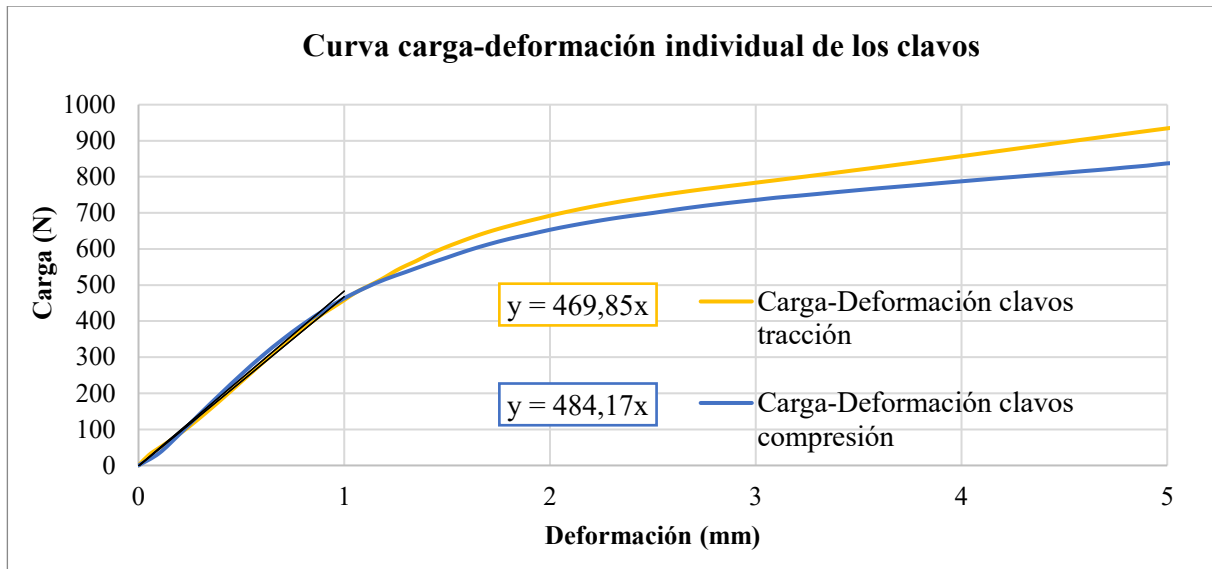


Figura 4.5 Curva Carga-Deformación individual de los clavos en Tracción y Compresión.

4.3 Cálculo de la capacidad de diseño que puede transmitir la unión.

De acuerdo con lo señalado en anexo 1.5, el diseño de la unión con 8 clavos se concibió para transmitir, como máximo, una carga de aproximadamente 1,7 kN. De acuerdo con los datos registrados para cada ensayo, la unión de 8 clavos resistió cargas máximas aproximadas de 13 kN en tracción y 10 kN en compresión.

Tanto en tracción como en compresión, el diseño demuestra un satisfactorio margen de seguridad, ya que la carga de diseño no se alcanzó antes del fallo de la unión. En el caso más desfavorable se tiene un factor de seguridad aproximado de $FS = \frac{10kN}{1,7kN} = 6,1$. De haberse producido el fallo a una carga inferior a la carga de diseño en cualquiera de las dos pruebas, se cuestionaría el diseño de la unión.

La figura presenta en el eje horizontal la capacidad de diseño de la unión compuesta por 8 clavos, tanto en condiciones de tracción como de compresión, además se presentan las curvas promedio de los ensayos a tracción y compresión, donde es posible notar que la carga de diseño se encuentra para ambos ensayos al comienzo de la parte lineal de las curvas, sin acercarse a la carga máxima, evidenciando el factor de seguridad establecido.

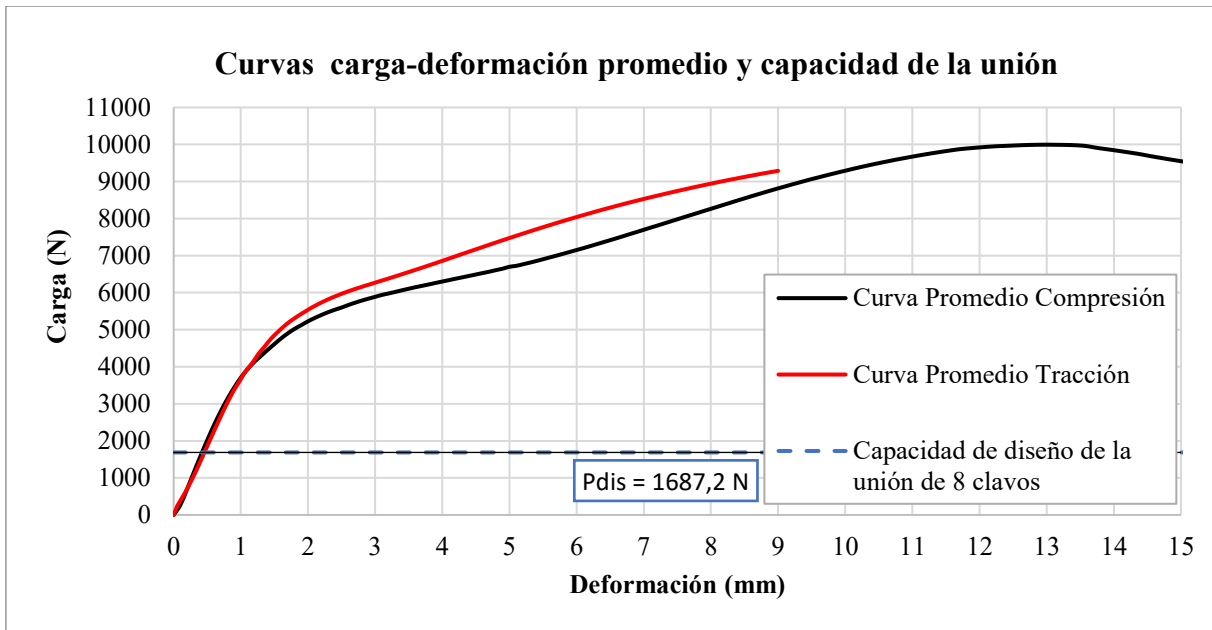


Figura 4.6 Capacidad de la Unión vs Curvas Promedio.

4.4 Módulos de corrimiento

La tabla 4.13 muestra los módulos de corrimiento estimados según la norma NCh1198 y el euro código 5. Además, presenta el módulo de deslizamiento inicial promedio (k_i) y el módulo de deslizamiento promedio (k_s) calculados para los ensayos de acuerdo con la norma EN26891.

Se proporciona el módulo de corrimiento representado por la pendiente k_1 , que corresponde al promedio de las pendientes estimadas a un 40% de la carga máxima estimada para el primer ciclo de carga en los ensayos. Adicionalmente se presenta el módulo de corrimiento asociado a la pendiente k_2 del segundo ciclo de carga de los ensayos.

Tabla 4.13 Módulos de Corrimiento en un clavo

Estimación	Módulo de Corrimiento de un clavo (N/mm)	
	Tracción	compresión
NCh1198	538	538
Eurocódigo	619	619
k_i	517	428
k_s	516	398
k_1	494	397
k_2	1411	765

La figura 4.7 muestra la comparación en magnitud de los módulos de corrimiento obtenidos, donde se puede apreciar que tanto en tracción como compresión el módulo k_2 se escapa notoriamente por sobre el resto de los módulos obtenidos.

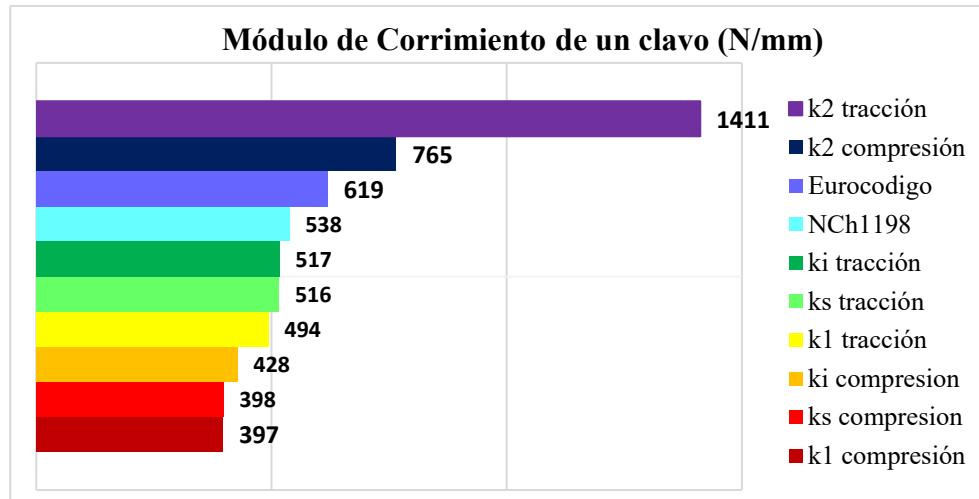


Figura 4.7 Comparación de Módulos de corrimiento

Se observa que los módulos de corrimiento estimados por las normativas NCh1198 y Eurocódigo 5 son mayores que los módulos k_i y k_s calculados de acuerdo con la norma EN26891 a partir de los ensayos realizados tanto en tracción como compresión. Se tiene además que el módulo de corrimiento considerado por el Eurocódigo 5 resulta mayor que el de la norma chilena NCh1998.

Para ambos ensayos la pendiente k_1 de la primera fase de carga es menor que las estimadas por NCh1198, Eurocódigo, y EN26891. En cambio, la pendiente k_2 de la segunda fase de carga, es mayor que las estimadas por NCh1198, Eurocódigo, y EN26891.

Los análisis realizados sugieren que los resultados de los ensayos experimentales han mostrado valores de corrimiento ligeramente menores de lo que se esperaba según la norma NCh1198, lo que significa que la norma tiende por el lado de la seguridad, pero no es excesivamente conservadora.

Considerando que la pendiente k_1 representa la relación entre la carga y el deslizamiento al aplicar la carga por primera vez, en el primer ciclo de carga, la unión puede experimentar cierto asentamiento o adaptación, lo que podría dar lugar a pendientes k_1 más bajas. En un ciclo de carga adicional, la unión podría alcanzar una configuración más estable y menos susceptible al deslizamiento, lo que resultaría en pendientes k_2 más altas que indican una mayor rigidez de la unión.

Se tiene además que para k_1 y k_2 , las pendientes promedio son mayores en tracción que en compresión, lo que sugiere que independiente del ciclo de carga existe una mayor rigidez cuando la fuerza se aplica paralela a la fibra de la madera.

Que las pendientes teóricas normativas sean mayores a la pendiente real k_1 , significa que, para un mismo nivel de carga, teóricamente se estima una menor deformación que la obtenida en el ensayo, lo que subestimaría la deformación de la unión en el rango elástico lineal.

Que las pendientes teóricas normativas sean menores a la pendiente real k_2 , significa que, para un mismo nivel de carga, teóricamente se estima una mayor deformación que la obtenida en el ensayo, sobreestimando la deformación de la unión en el rango elástico lineal. Desde el punto de vista de la seguridad, es preferible que se estimen mayores deformaciones que las reales.

En cuanto a las diferencias entre los resultados de módulo de corrimiento k_i , k_s y los módulos k_1 , k_2 se puede considerar que los módulos k_1 y k_2 son más representativos del comportamiento real obtenido en los ensayos de uniones, pues estos se obtuvieron directamente del análisis de cada curva, en cambio los módulos k_i y k_s se calculan considerando una fuerza máxima estimada, según las ecuaciones 7 y 8 del apartado 8.5 de la norma EN2689.

4.5 Gráfico ensayos de vigas laminación vertical

La figura 4.8 presentan la curva de carga-deformación de las vigas, con respecto al eje neutro de la viga, para las vigas continuas y las vigas de empalme.

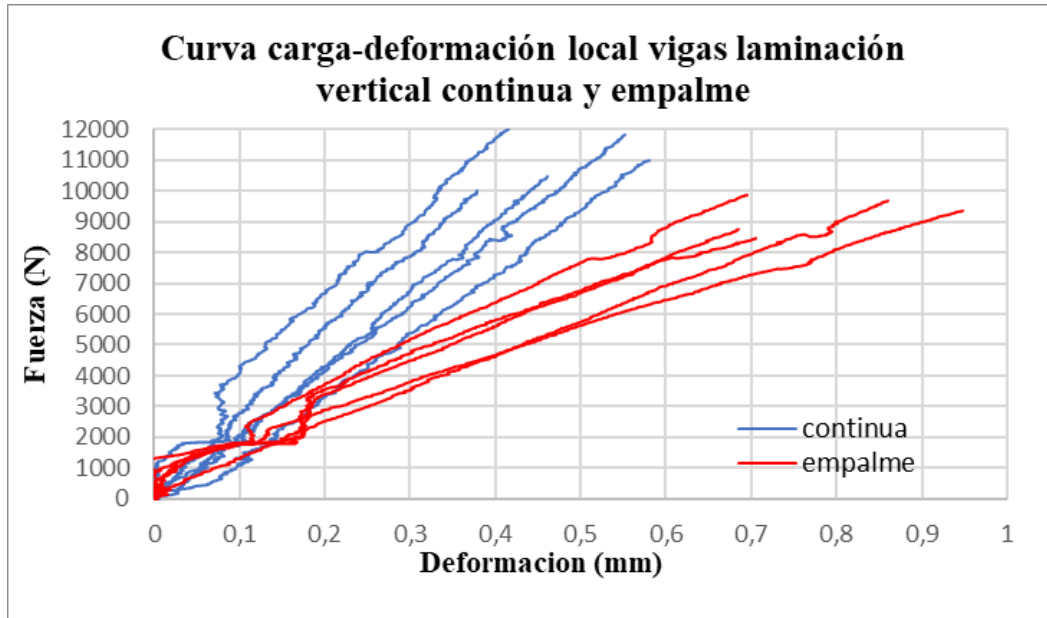


Figura 4.8 Curvas carga-deformación vigas laminación vertical para MOE local.

La figura 4.9 presenta la curva de carga-deformación registrando la deformación entre los puntos de apoyo, para las vigas verticales continuas y las vigas verticales de empalme. Los ensayos presentados son sin llegar a la rotura para obtener MOE global.

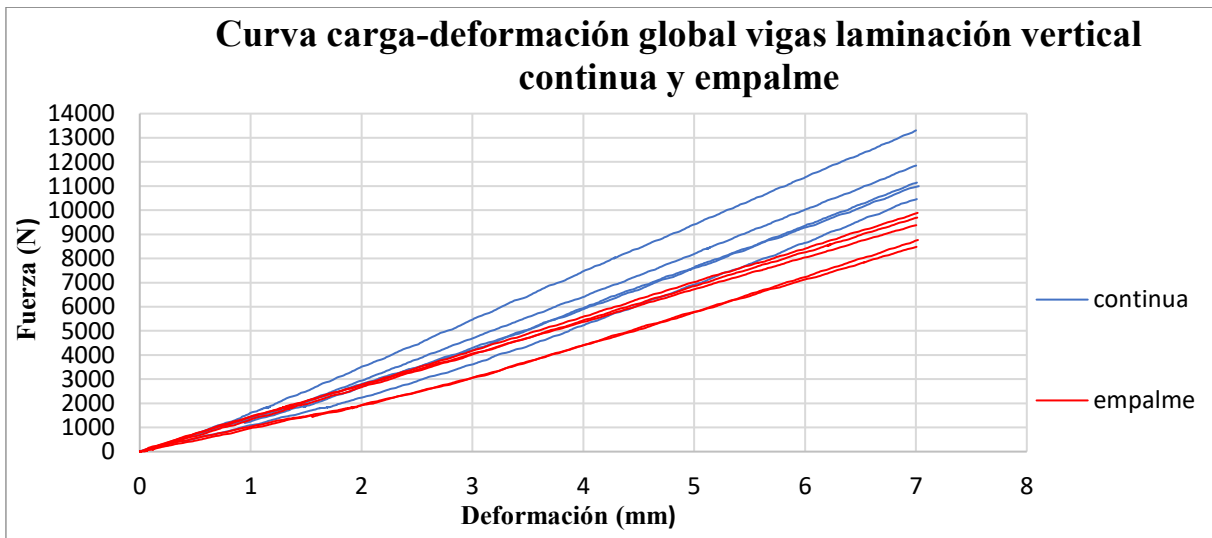


Figura 4.9 Curvas carga-deformación vigas laminación vertical para MOE global

La figura 4.10 muestra las curvas del ensayo de rigidez global para las vigas en laminación vertical continuas y con empalme hasta la rotura.

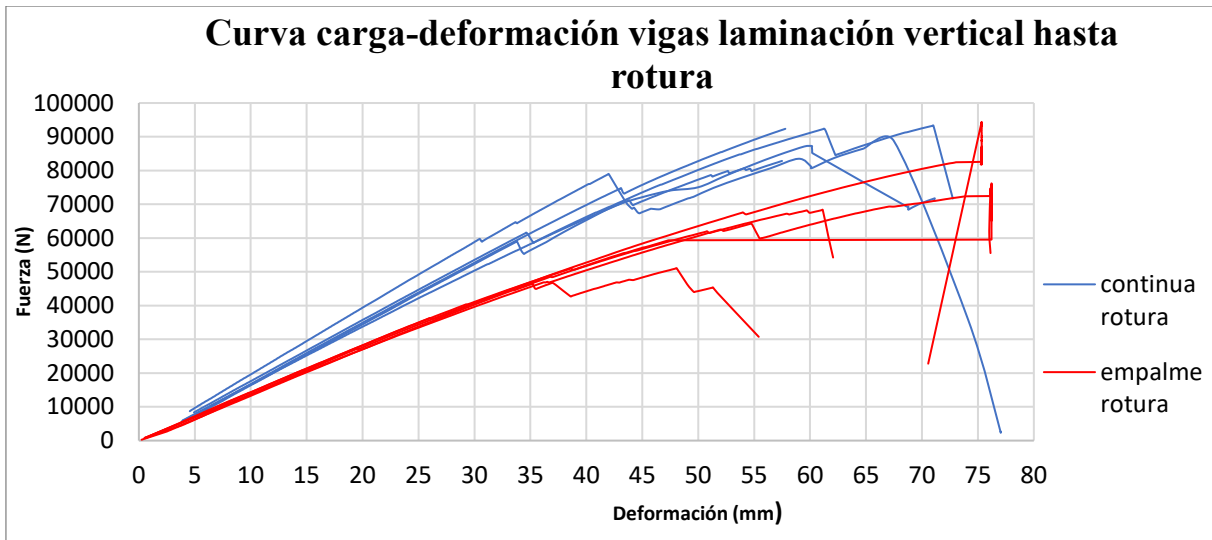


Figura 4.10 Curvas carga-deformación vigas laminación vertical hasta rotura

4.6 Gráfico ensayos de vigas laminación horizontal

La figura 4.11 presenta la curva de carga-deformación con respecto al eje neutro de la viga, para las vigas horizontales continuas y las vigas horizontales de empalme.

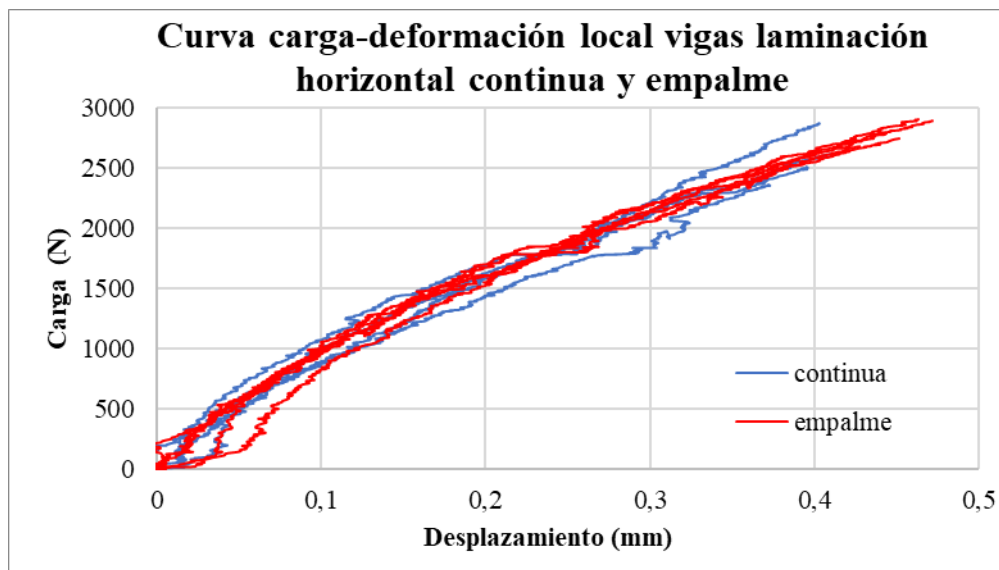


Figura 4.11 Curvas carga-deformación vigas laminación horizontal para MOE local.

La figura 4.12 presenta la curva de carga-deformación registrando la deformación entre los puntos de apoyo, para las vigas horizontales continuas y las vigas horizontales de empalme. Los ensayos presentados son sin llegar a la rotura para obtener MOE global.

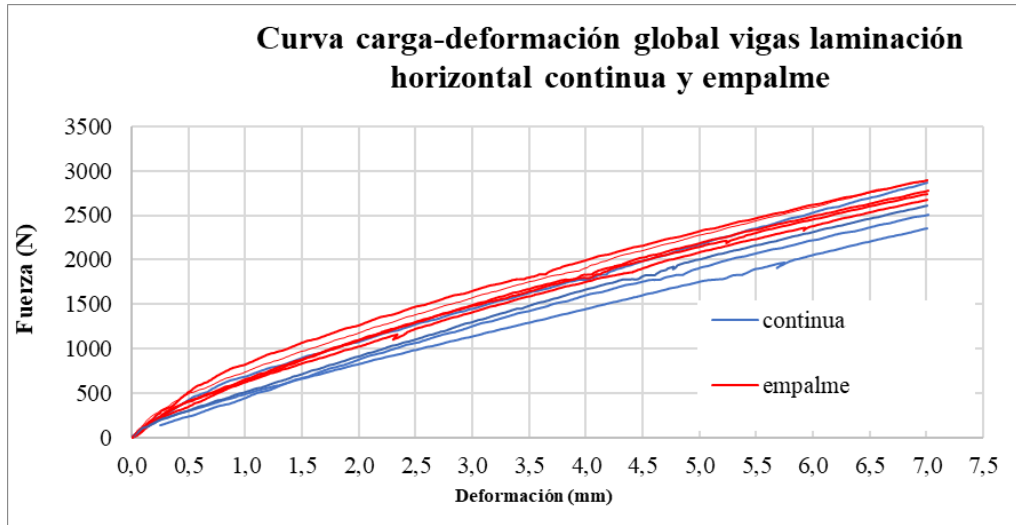


Figura 4.12 Curvas carga-deformación vigas laminación vertical para MOE global

4.7 Resultados de Ensayos de vigas NLT en laminación vertical

A continuación se presenta la estadística descriptiva de los resultados para las vigas continuas y con empalmes. En el anexo 1.8 se muestra cómo se obtienen los cálculos señalados.

Tabla 4.14 Estadística Descriptiva resultados para vigas en laminación vertical continua.

ESTADISTICA DESCRIPTIVA VIGAS LAMINACIÓN VERTICAL CONTINUA						
	MOE Global (N/mm ²)	EI global (kN·m ²)	MOE Local (N/mm ²)	EI local (kN·m ²)	Fmáx (kN)	Momento Flector (kN·m)
Promedio	9772	1006	13014	1340	91	50
Min	8460	871	11546	1189	87	48
Máx	11757	1211	15347	1581	93	51
Rango	3297	340	3800	391	6	3
Desviación Estándar	1340	138	1519	156	3	2
CV (%)	13,7%	13,7%	11,7%	11,7%	3,0%	3,0%

Tabla 4.15 Estadística Descriptiva resultados para vigas en laminación vertical con empalmes

ESTADISTICA DESCRIPTIVA VIGAS LAMINACIÓN VERTICAL EMPALMES						
	MOE Global (N/mm ²)	EI global (kN·m ²)	MOE Local (N/mm ²)	EI local (kN·m ²)	Fmáx (kN)	Momento Flector (kN·m)
Promedio	7894	813	6289	648	73	40
Min	7282	750	5132	529	51	28
Máx	8396	865	7924	816	94	52
Rango	1114	115	2792	288	43	24
Desviación Estándar	529	54	1012	104	16	9
CV (%)	6,7%	6,7%	16,1%	16,1%	21,4%	21,4%

En general, las vigas continuas muestran valores más altos de MOE Global, EI Global, MOE Local y EI Local en comparación con las vigas con empalmes. Esto sugiere que las vigas con laminación vertical continua tienden a ser más fuertes y rígidas en términos de sus propiedades de elasticidad y resistencia a la flexión en comparación con las vigas con empalmes a tope. Asimismo, las vigas con laminación vertical continua pueden soportar cargas más altas antes de llegar a su límite de resistencia. La presencia de empalmes entre las laminaciones puede afectar la distribución de cargas. Los empalmes son áreas críticas donde se necesita una transferencia eficiente de carga, y los clavos pueden ser esenciales para asegurar una conexión robusta en estos puntos.

Las vigas con empalmes tienen una mayor variabilidad de MOE local y fuerza máxima, como se refleja en los coeficientes de variación más altos en comparación con las vigas continuas. Esto indica que las vigas con empalmes a tope pueden mostrar una mayor variabilidad en sus características mecánicas.

Para las vigas con laminación vertical, la elección de la laminación (continua o con empalmes) puede ser crítica para el rendimiento de las vigas en aplicaciones específicas. Las vigas con laminación vertical continua pueden ser preferibles cuando se busca una mayor resistencia y rigidez, mientras que las vigas con empalmes a tope pueden ser una opción adecuada si se permite una variabilidad mayor en las propiedades.

La tabla 4.16 muestra las diferencias porcentuales promedio entre los resultados obtenidos para vigas con laminación vertical continuas y vigas con laminación vertical con empalmes.

Tabla 4.16 Diferencia entre resultados para vigas en laminación vertical.

vigas laminación vertical	Diferencia continua y empalme (%)
EI global	25%
EI local	111%
Fmáx	29,1%
Momento Flector	29,1%

En promedio la fuerza máxima alcanzada y el momento flector es 29% mayor en las vigas continuas que en las con empalmes. La diferencia de los resultados promedio obtenidos para rigidez local entre las vigas continuas y con empalmes es significativo, teniendo una diferencia del 111% , siendo la rigidez local en las vigas continuas (13014 N/mm²) más del doble que en las con empalmes (6289 N/mm²)

4.8 Resultados de Ensayos de vigas NLT en laminación horizontal.

A continuación, se presenta la estadística descriptiva de los resultados para las vigas continuas y con empalmes.

Tabla 4.17 Estadística Descriptiva resultados para vigas en laminación horizontal.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA VIGAS LAMINACIÓN HORIZONTAL								
	continua				empalmes			
	MOE Global (N/mm ²)	EI global (kN·m ²)	MOE Local (N/mm ²)	EI local (kN·m ²)	MOE Global (N/mm ²)	EI global (kN·m ²)	MOE Local (N/mm ²)	EI local (kN·m ²)
Promedio	2706	279	3079	317	3172	327	2952	304
Min	2378	245	2431	250	2798	288	2829	291
Máx	2935	302	3880	400	3423	353	3180	327
Rango	557	57	1449	149	625	64	351	36
Desviación Estándar	235	24	599	62	234	24	140	14
CV(%)	8,7%	8,7%	19,5%	19,5%	7,4%	7,4%	4,7%	4,7%

En vigas de laminación horizontal continua, las propiedades de rigidez (MOE y EI) en ambas escalas (global y local) muestran valores más bajos en comparación con las vigas con empalmes. Las vigas continuas y con empalme muestran una variabilidad similar en el MOE global, no obstante, en el MOE local, las vigas con empalmes muestran un CV más bajo, lo que significa que, en términos locales, hay una menor variabilidad de los resultados. Las diferencias en MOE y EI entre los dos grupos son más notables en términos locales, lo que sugiere que el tipo de laminación puede influir en las propiedades en una escala más detallada.

La tabla 4.18 muestra las diferencias porcentuales promedio entre los resultados obtenidos para vigas con laminación horizontal continuas y vigas con laminación horizontal con empalmes.

Tabla 4.18 Diferencia entre resultados para vigas en laminación horizontal.

vigas laminación horizontal	Diferencia continua y empalme (%)
EI global	15%
EI local	4%

De los resultados es posible notar que en vigas con laminación horizontal, las diferencias entre los EI de las vigas continuas y las vigas con empalme no son significativos. La mayor diferencia detectada

entre las vigas continuas y con empalme es el EI global que es un 15% mayor en las vigas con empalmes. En cambio, para el EI local este es un 4% menor en las vigas con empalmes

4.9 Comparación resultados viga en laminación vertical y laminación horizontal.

Independiente de si se trata de vigas continuas o con empalmes la rigidez de las vigas con laminación vertical es mayor que la rigidez de las vigas con laminación horizontal. Esto puede deberse a que en laminación vertical continua los clavos no trabajan, y se activan sólo en los casos de vigas verticales con empalme.

En cambio en vigas con laminación horizontal los clavos se activan de inmediato pues en una viga compuesta por piezas horizontales superpuestas, cada una de las vigas tiende a deslizarse horizontalmente respecto a las adyacentes bajo la actuación de una carga, es por ello por lo que se unen con un medio de unión (clavos) que sean capaz de resistir las fuerzas rasantes correspondientes. Cuando las cargas aplicadas a una estructura generan tensiones cortantes, como las que ocurren en los clavos, y estos empiezan a experimentar desplazamientos relativos entre las capas o elementos unidos, se activa el módulo de corrimiento en esos puntos específicos, este fenómeno es más evidente en situaciones donde hay deslizamiento entre las superficies de contacto como es el caso de las vigas de laminación horizontal.

La tabla 4.19 muestra el promedio de la rigidez global entre vigas continuas y viga con empalme para laminación vertical y para laminación horizontal. Se muestra también el promedio de la rigidez local entre vigas continuas y viga con empalme para laminación vertical y para laminación horizontal.

Tabla 4.19 Diferencia de resultados entre vigas en laminación vertical y horizontal.

	laminación vertical	laminación horizontal
EI global promedio entre continuas y empalmes (kN·m²)	910	303
EI local promedio entre continuas y empalmes (kN·m²)	994	311

Es posible notar que la rigidez global y la rigidez local es aproximadamente 3 veces mayor en vigas con laminación vertical que con laminación horizontal. Aunque los resultados muestren una tendencia bastante clara de la diferencia entre el comportamiento de vigas en laminación vertical y vigas en laminación horizontal, debe tenerse en cuenta que el estudio se realizó para una muestra reducida, por tanto, para que los resultados sean representativos se requiere la realización de más ensayos con la cantidad suficiente de muestras de acuerdo con la normativa chilena NCh3028-2:2017.

Es claro que la laminación vertical es más rígida, ya que cuando el módulo de corrimiento no se activa, las capas de la viga están más firmemente unidas, lo que permite una transmisión más directa de las cargas a lo largo de las laminaciones, de esta forma la falta de deslizamiento entre las capas contribuye a una distribución más eficiente de las cargas a lo largo de la viga.

En contraste, en las vigas de laminación horizontal, el módulo de corrimiento se activa de inmediato, posiblemente en mayor medida.

Para las vigas de laminación horizontal la activación del módulo de corrimiento implica deslizamiento relativo entre las laminaciones horizontales de la viga. Este deslizamiento puede introducir una mayor flexibilidad en la estructura, ya que las capas pueden moverse más libremente entre sí, lo que contribuye a una menor rigidez flexural. A pesar de estas observaciones, aún se requieren modelos numéricos adicionales para profundizar en el estudio de este fenómeno.

La figura 4.13 muestra las curvas carga-deformación global para las vigas en laminación vertical y en laminación horizontal, ambas considerando la viga continua y la con empalmes. Se puede evidenciar visualmente la mayor rigidez global para las vigas en laminación vertical, y a su vez la mayor dispersión de los resultados. También es posible notar la baja variabilidad de los resultados a nivel global de las vigas con laminación horizontal, y la ligera diferencia entre vigas horizontales con empalme y continuas.

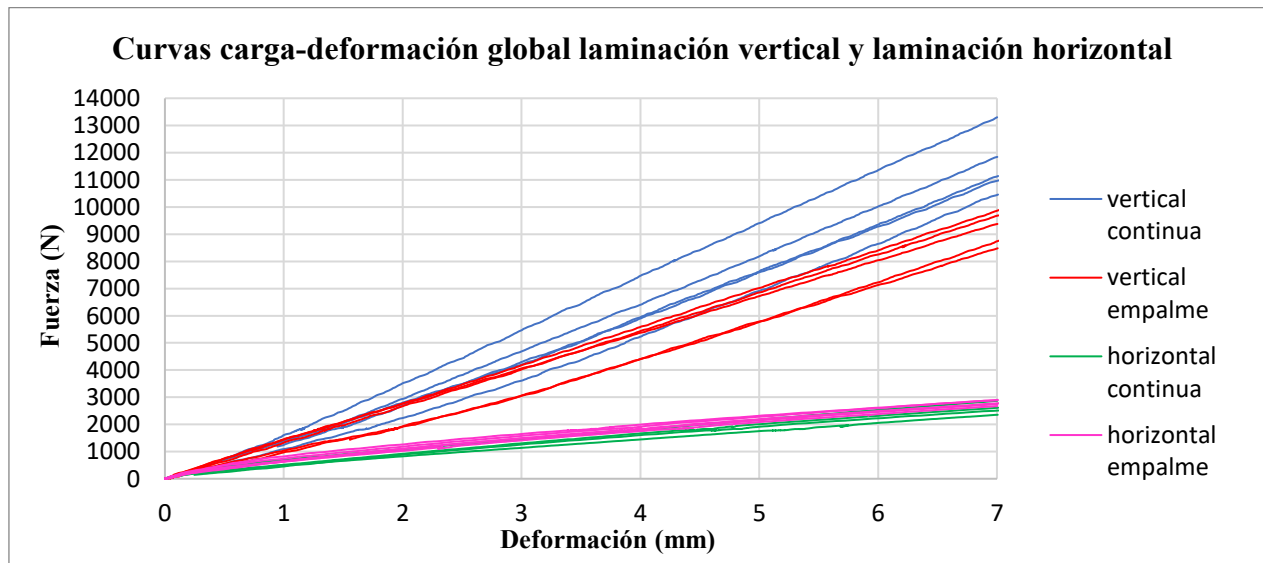


Figura 4.13 Comparación rigidez global vigas laminación vertical y laminación horizontal.

La figura 4.14 muestra las curvas carga-deformación local para las vigas en laminación vertical y en laminación horizontal, ambas considerando la viga continua y la con empalmes.

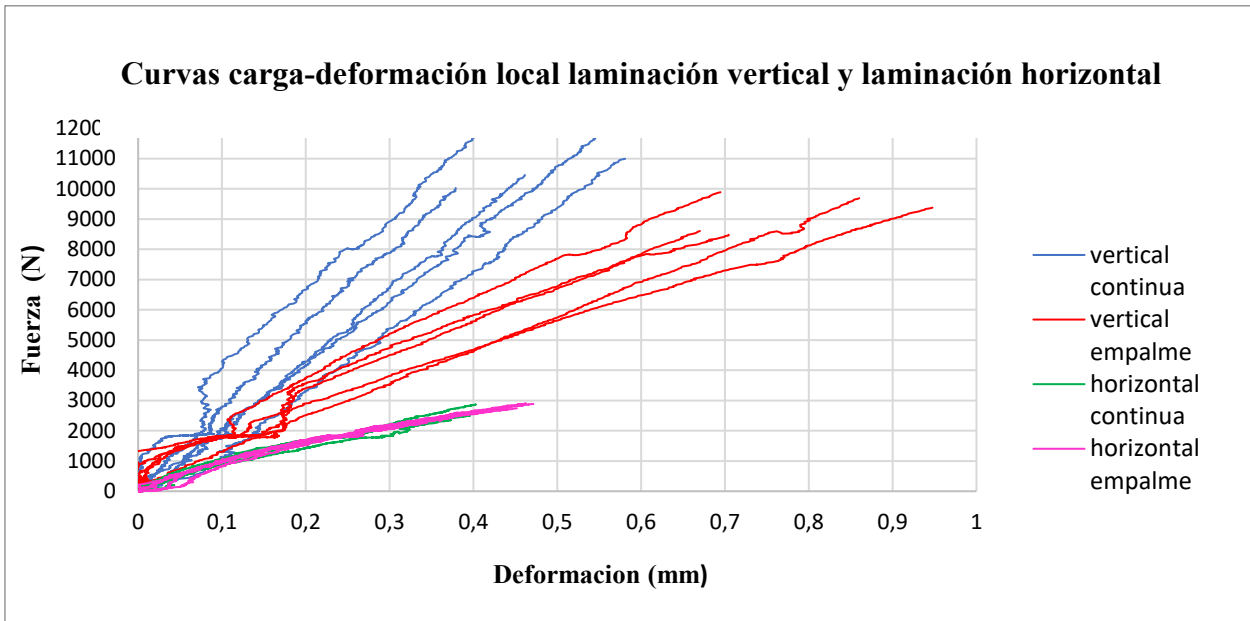


Figura 4.14 Comparación rigidez local vigas laminación vertical y laminación horizontal.

Se puede evidenciar visualmente la mayor rigidez local para las vigas en laminación vertical ya sea vigas continuas o con empalmes, no obstante, también queda en evidencia una mayor dispersión de los resultados a nivel local para las vigas en laminación vertical en comparación con las de laminación horizontal, que presentan baja variabilidad y una similitud entre los ensayos de vigas continuas y con empalmes. Del gráfico es posible notar que la deformación local tiene un comportamiento distinto a la deformación global que tiende a ser mucho más lineal.

4.10 Relaciones constitutivas en la interfaz de clavado de uniones

Las relaciones constitutivas son ecuaciones o expresiones que describen la relación entre las propiedades de un material y su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga. Estas relaciones son fundamentales para comprender y predecir cómo un material responde a las fuerzas y las deformaciones a las que está sometido. Esto permite la realización de estudios numéricos para comprender los mecanismos que intervienen en la deformación del elemento estructural, durante la aplicación de la carga.

El módulo de corrimiento o deslizamiento puede considerarse una relación constitutiva que describe la relación entre la fuerza aplicada en la dirección del corte y el desplazamiento relativo entre las 2

superficies adyacentes de la unión proporcionando información sobre la rigidez de la unión o la resistencia al deslizamiento entre las superficies en contacto.

Para la modelación de una viga clavada mediante un modelo numérico, por ejemplo de elementos finitos, se requiere conocer la rigidez de la conexión, para ello en base a los análisis de los ensayos realizados, considerando el ensayo a tracción paralela, se puede establecer que para el tipo de madera utilizada y el diámetro de clavo $d=2,8\text{mm}$, se tiene un módulo de corrimiento de 494 N/mm .

Cabe señalar, que para las estimaciones del módulo de deslizamiento del Eurocódigo y la norma chilena, dicho módulo depende del diámetro del clavo, teniendo para diámetros mayores una mayor rigidez.

4.11 Modelación de vigas laminadas clavadas

Para modelar una viga laminada clavada, se puede utilizar el método de elementos finitos, donde cada lámina de madera se modela como un elemento de viga y los conectores se modelan como resortes representados con elementos link entre los nodos del eje central de las láminas vecinas con la rigidez K del conector.

La figura 4.15 a) muestra el esquema de una viga clavada con laminación horizontal de sección $b \times h_1$ y longitud L , conformada por n láminas de sección $b \times h$. La figura 4.15 b) muestra el esquema de un corte longitudinal de la viga clavada con laminación horizontal simplemente apoyada y con una carga aplicada.

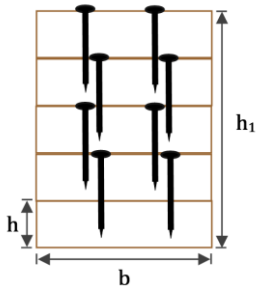


Figura 4.15
a) Esquema sección de viga con laminación horizontal.

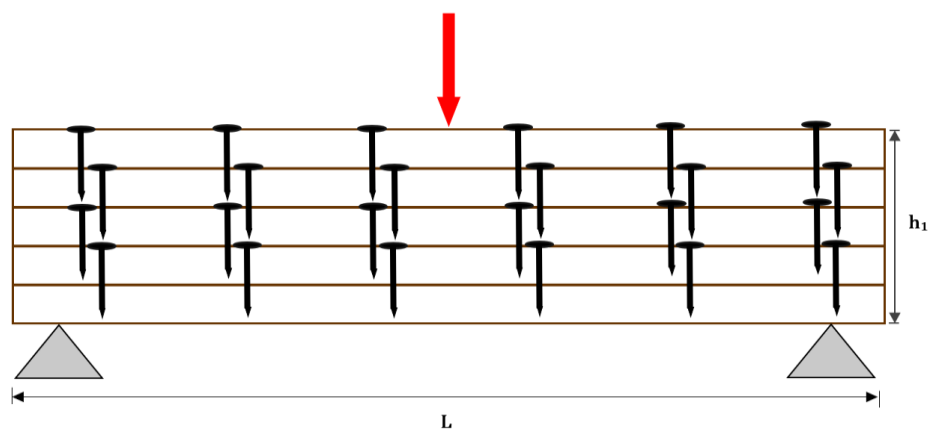


Figura 4.15 b) Esquema viga laminación horizontal simplemente apoyada con carga aplicada

La figura 4.16 muestra el comportamiento de los conectores que conforman la viga ante el deslizamiento entre láminas producto de la carga aplicada, en esta figura se tiene la modelación descrita, donde 2 láminas de madera se encuentran unidas por un conector de rigidez K .

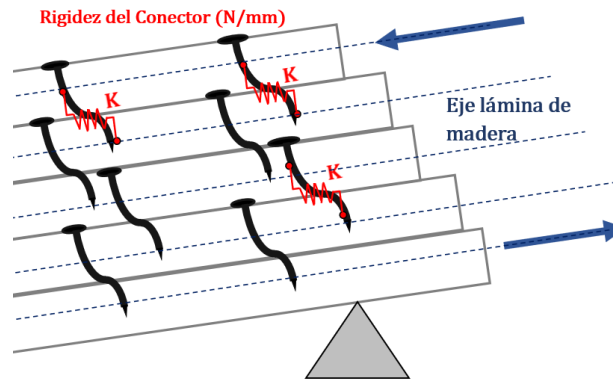


Figura 4.16 Esquema corte frontal de la viga clavada de laminación horizontal, modelación de conectores con rigidez K

La figura 4.17 a) muestra el esquema de una viga clavada con laminación vertical de sección $b_2 \times h_2$ y longitud L , conformada por n láminas de sección $b \times h$ y longitud L , dispuestas de forma vertical. La figura 4.17 b) muestra el esquema de un corte longitudinal de la viga clavada con laminación vertical simplemente apoyada y con una carga aplicada. En laminación vertical, los resortes se activan con desplazamientos relativos de los tableros que hacen trabajar los clavos en extracción lateral.

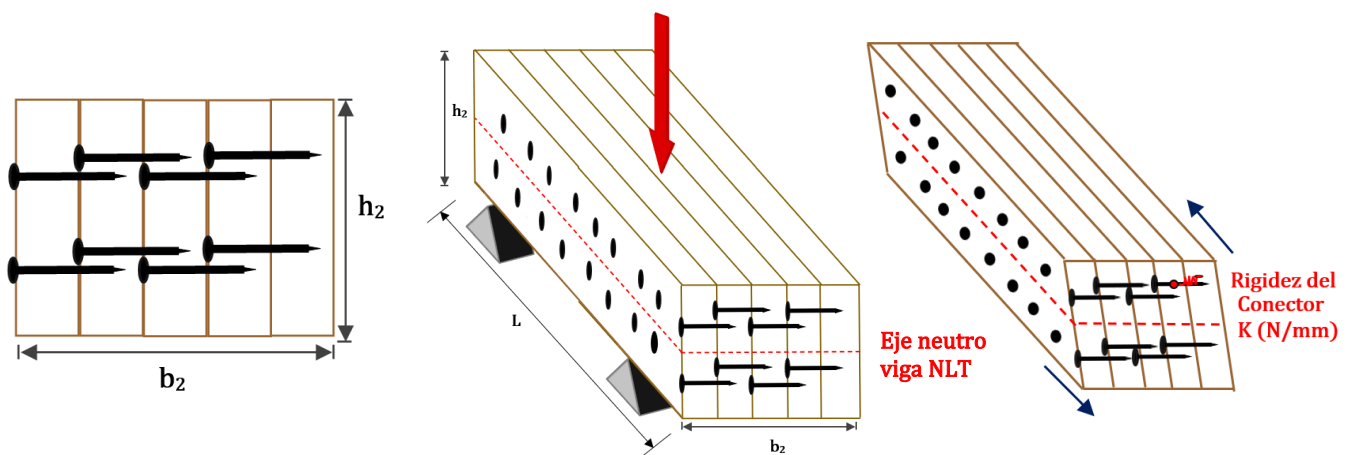
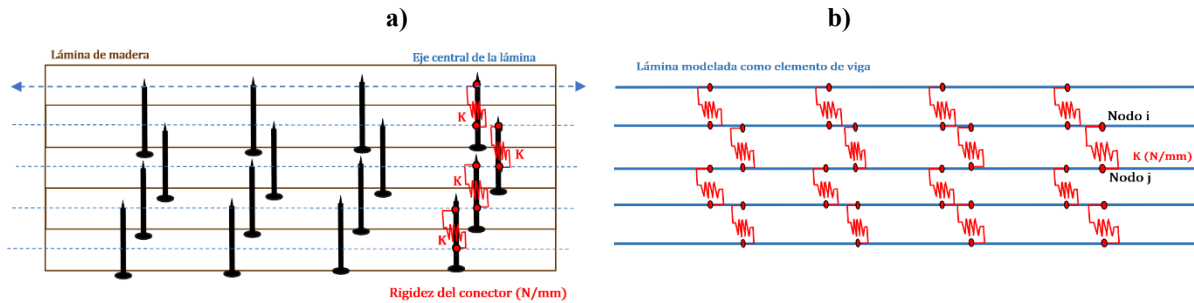


Figura 4.17 a) Esquema de corte lateral (sección) de viga clavada con laminación vertical

Figura 4.17 b) Esquema de viga vertical simplemente apoyada con carga aplicada

La figura 4.18 a) es un esquema de un corte en vista superior de la viga clavada con laminación vertical, la viga tiene sección $b_2 \times h_2$ y longitud L . La figura 4.18 b) muestra en vista superior, la modelación de las láminas verticales, representadas como elementos de viga unidas por resortes de rigidez K , con sus extremos en los nodos ubicados en el eje central de las láminas de madera consecutivas.



**Figura 4.18 a) Esquema vista corte superior viga clavada en laminación vertical,
b) Modelación de láminas unidas por conectores con rigidez K entre nodos**

4.12 Conclusiones

En el presente capítulo se presentó la realización y el correspondiente análisis de resultados de ensayos de uniones clavadas, los cuales consideraron empalme traccionado bajo esfuerzo de carga paralela a la fibra, y empalme comprimido bajo fuerza de compresión perpendicular a las fibras de los maderos laterales. Se pudo comprobar que la respuesta de la unión varía según si se aplica la fuerza de manera paralela o perpendicular a las fibras.

Se presentaron los resultados obtenidos de los ensayos de vigas laminadas clavadas continuas y con empalmes a tope, dispuestas en laminación horizontal y en laminación vertical. Se destacan las diferencias entre resultados en laminación vertical y horizontal, y entre vigas continuas y vigas con empalmes. Se comprobó con los ensayos, que las vigas en laminación vertical presentan mayor rigidez, tal como se señaló en los antecedentes de otras investigaciones en vigas clavadas.

El análisis de estos resultados proporciona un fundamento para la formulación de conclusiones respaldadas científicamente, así como para la identificación de posibles áreas de investigación futura.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

Para la primera línea de investigación se realizaron comparaciones entre los ensayos a tracción y compresión, donde se pudo evidenciar que los ensayos presentan comportamientos distintos a lo largo del ciclo de carga. Siendo los ensayos a compresión más homogéneos en comparación a los de tracción. Las propiedades físicas de las probetas en tracción y compresión presentan gran similitud, por tanto, se puede realizar la comparación sin que las propiedades físicas sean un factor influyente en las diferencias obtenidas.

La deformación máxima en promedio es muy similar en ambos ensayos, por tanto, al alcanzar la deformación máxima no resulta influyente la dirección perpendicular o paralela a la fibra. En el caso de la carga máxima promedio, es mayor en las pruebas a tracción paralela alcanzando máximos más altos que las cargas aplicadas de manera perpendicular, por lo que se infiere que la carga máxima se ve afectada por la dirección de aplicación de la carga. De los resultados se puede interpretar que las cargas aplicadas en la dirección de la fibra tienden a ser más eficientes pues resiste mayores cargas antes de la rotura, y su rigidez es mayor.

En lo que respecta al deslizamiento inicial de las curvas o el acomodo antes de entrar en la fase lineal, este se apreciable y cuantificable en las curvas a compresión, a diferencia de los ensayos a tracción donde este fenómeno es imperceptible y tiende a ser despreciable. Esta diferencia en el comportamiento puede deberse a que, en el ensayo a compresión perpendicular, las fibras en la zona de la unión interactúan con los clavos de tal forma que estos se ajustan al aplicar la carga, dando lugar a un deslizamiento inicial antes de que se establezca una distribución uniforme de la carga en la unión. En el caso de la tracción paralela, la ausencia del acomodo inicial puede deberse a que al aplicar la carga en la misma dirección que las fibras, no se requiere que los clavos se acomoden o ajusten en respuesta de la carga inicial.

Las deformaciones remanentes, son muy similares para los ensayos a compresión y tracción, por lo que no hay influencia del tipo de ensayo en la deformación que permanece después de haberse sometido a un ciclo de carga y descarga.

Para los puntos de interés de la norma EN26891, en ambos ensayos los puntos más cercanos al comienzo de la curva tienden a mostrar menor variabilidad en comparación con los puntos más alejados. El punto v_{01} muestra una gran similitud para ensayo a tracción y compresión, el resto de los puntos reflejan diferencias entre ambos ensayos, aunque estas diferencias son pequeñas y no superan 1 mm a excepción del punto v_{28} .

En cuanto a las pendientes en las fases de carga inicial k_1 y la segunda fase de carga k_2 , en ambos ensayos la pendiente k_2 es significativamente mayor que k_1 , lo que indica una mayor resistencia durante la fase del segundo incremento de carga en comparación con la fase de carga inicial independiente de la dirección paralela o perpendicular a la fibra. La pendiente k_1 tiende a ser mayor en los ensayos a tracción, lo que indica que cuando la fuerza se aplica en dirección paralela a la fibra, se tiene una mayor rigidez, o una mayor capacidad de resistir la deformación.

En base a los análisis de los ensayos realizados, considerando el ensayo a tracción paralela, se puede establecer que para el tipo de madera utilizada y el diámetro de clavo $d = 2,8 \text{ mm}$, se tiene un módulo de corrimiento de 494 N/mm, el que puede ser utilizado como la rigidez de la conexión para la modelación de una viga clavada mediante un modelo de elementos finitos, y de esa manera profundizar en la comprensión del comportamiento de vigas clavadas.

Para la segunda línea de investigación se analizaron los resultados de los ensayos para rigidez global y local en vigas en laminación vertical y laminación horizontal. Los resultados de los ensayos en laminación vertical muestran una contundente diferencia entre la rigidez de vigas continuas y de vigas con empalme, tanto en términos globales como locales, lo que evidencia la importancia en términos de rigidez y de fuerza máxima alcanzada entre una y otra opción de diseño. En las vigas con laminación horizontal, se pudo comprobar que las diferencias entre vigas continuas y con empalmes no es realmente significativa para la rigidez de la viga, por lo menos para los casos de ensayos disponibles.

Adicionalmente se realizaron comparaciones entre los ensayos de vigas en laminación vertical y horizontal, destacando que la rigidez de la viga en laminación vertical puede llegar a ser aproximadamente tres veces la de la misma viga, pero puesta en laminación horizontal.

5.2 Futuras líneas de investigación

Se propone la modelación de las vigas laminadas clavadas mediante modelo numéricos, por ejemplo utilizando el método de elementos finitos, utilizando como rigidez de la conexión el módulo de corrimiento obtenido del análisis de 494 N/mm, como valor confirmado para el calibre del clavo ensayado. Se sugiere incorporar al análisis, modelaciones de diferentes casos de estudio de vigas laminadas clavadas, incorporando distintos largos, variaciones en los patrones de clavado y en el diámetro del conector.

Se recomienda llevar a cabo ensayos de uniones a tracción utilizando diferentes diámetros de conector, para cuantificar y analizar experimentalmente la variación en el módulo de corrimiento del conector en función del diámetro elegido. Se espera que estos ensayos entreguen información adicional sobre el comportamiento de las uniones clavadas, lo que puede ser incorporado a la modelación de vigas laminadas clavadas.

Asimismo, es recomendable llevar a cabo ensayos con diferente patrón de clavado de vigas laminadas clavadas con un mayor número de probetas de vigas continuas y de vigas con empalme para resultados más representativos. También se sugiere la elaboración de vigas clavadas con el mismo diámetro de clavo y patrón de clavado, pero diferentes cantidades de láminas.

REFERENCIAS

- EN 26891. (1991). *Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Principios generales para la determinación de las características de resistencia y deslizamiento.*
- Bohnhoff. (1992). *Modeling Horizontally Nail-Laminated Beams.*
- BSLC. (2017). *NAIL LAMINATED TIMBER U.S. Design & construction guide v1.0.*
- CORMA. (2022). *Madera21.* Obtenido de <https://www.madera21.cl/2757-2/>
- Haller, P., & Pannke, K. (1998). Structural and physical behaviour of nailed laminated timber elements. *World Timber Engineering Conference.*
- INFOR. (2020). *LA MADERA ES UN MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN SUMENTABLE.*
- INFOR. (2020). *Productos de ingeniería en madera.*
- INFOR. (2022). *CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA LAMINADA CLAVADA FABRICADA CON MADERA ASERRADA ESTRUCTURAL DE PINO RADIATA.*
- Jimenez Von Bischoffshausen, G. J. (1990). *Capacidades admisibles de medios de union mecanicos elaborados de madera microlaminada.*
- Mascia, N. T., & Santana, C. L. (2009). Remarks on the slip modulus of nailed connections for linear analysis of plywood timber beams. *Construction and Building Materials.*
- Meghlat, E.-M., Oudjene, M., Ait-Aider, H., & Batoz, J.-L. (2013). A new approach to model nailed and screwed timber joints using the finite element method. *Construction and Building Materials.*
- NCh 1198:2014. . (s.f.). *Madera - Construcciones en madera.*
- Think Wood. (2022). *Think Wood.* Obtenido de <https://www.thinkwood.com/mass-timber/nail-laminated-timber-nlt>
- Tjondro, J. A., Budianto, H., & Aryakusuma, W. (2011). THE FLEXURAL STRENGTH AND RIGIDITY OF ALBASIA NAIL-LAMINATED BEAM. *Civil Engineering Forum.*

ANEXOS

ANEXO 1.1 Contribución a los objetivos sostenibles

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 el mundo. Con el desarrollo de esta memoria, se contribuye a los siguientes ODS:

- 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
<p>ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura: La investigación de las uniones de madera clavada impulsa la adopción de este enfoque constructivo en la industria, incentivando la innovación en prácticas de diseño e infraestructura.</p> <p>ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles: El estudio de las uniones de madera clavada fomenta la utilización de la madera en la construcción, contribuyendo así al desarrollo de ciudades y entornos más sostenibles para las comunidades.</p>

ODS 12: Producción y Consumo Responsables: El análisis de las conexiones clavadas, promueve el uso responsable de la madera como alternativa frente a otros materiales de construcción con impacto ambiental más significativo. Al incentivar el uso de la madera, se estimula la demanda de recursos de construcción con un menor impacto en el entorno natural.

ODS 13: Acción por el Clima: Incentivar el uso de la madera para la construcción de viviendas, genera menos gasto de energía y emisiones de CO₂, respecto de otros materiales de construcción.

ANEXO 1.2 Datos Propiedades físicas de las probetas.

Tabla A1.2.1 Registro de humedad y densidad probetas tracción.

Probeta	Registro de Humedad Tracción					Densidad Probetas Tracción		
	lado 1 (%)	lado 2 (%)	lado 3 (%)	lado 4 (%)	CH (%) promedio Probeta	Peso Total probeta (kg)	Peso sin clavos (kg)	Densidad Total probeta (kg/m ³)
1	12,3	11,7	12,6	11,7	12,1	5,4	5,3	492,7
2	10,5	10,4	12,5	11,4	11,2	4,9	4,9	450,4
3	9,4	12,8	13,6	12,5	11,6	5,1	5,1	469,9
4	11,1	12,1	13,0	11,9	12,0	5,5	5,4	502,0
5	12,5	14,2	11,9	11,7	12,6	5,4	5,4	496,9
6	12,5	12,3	12,6	11,5	12,2	5,5	5,4	505,7
7	11,8	11,4	12,2	11,7	11,8	5,4	5,4	497,8
8	12,3	13,8	11,9	11,7	12,4	5,3	5,3	487,6
9	12,1	12,3	10,7	11,2	11,6	5,2	5,1	473,2
10	10,4	11,7	10,8	13,2	11,5	5,2	5,1	474,1
11	11,2	9,7	11,4	12,1	11,1	5,6	5,5	513,1
12	10,8	12,6	12,5	11,5	11,9	5,1	5,1	472,3
13	10,0	9,8	12,3	12,5	11,2	5,0	5,0	459,7
14	9,4	10,2	12,1	11,9	10,9	4,8	4,7	435,6
15	10,4	10,1	11,2	12,7	11,1	4,8	4,8	443,9
16	10,8	12,5	12,2	11,2	11,7	5,3	5,3	490,4
17	10,0	9,7	13,3	12,5	11,4	5,3	5,2	482,0
18	12,3	11,9	12,4	11,4	12,0	5,3	5,3	490,8
19	12,9	12,6	11,7	11,4	12,2	5,3	5,2	482,9
20	11,9	12,2	12,1	12,3	12,1	5,3	5,3	489,9
21	10,1	11,2	11,6	12,7	11,4	5,0	4,9	454,6
22	12,6	10,9	11,6	11,2	11,6	5,4	5,4	498,7
23	12,2	13,3	12,6	10,7	12,2	5,3	5,2	482,5
24	10,9	11,2	12,9	10,0	11,3	4,6	4,6	423,5
25	10,0	10,9	12,7	12,9	11,6	4,7	4,6	427,7
26	11,6	9,4	10,8	13,3	11,3	5,0	4,9	458,3
27	12,1	12,5	12,6	11,5	12,2	5,5	5,5	508,9
28	10,5	13,6	12,6	11,6	12,1	5,0	4,9	457,4
29	9,5	10,0	12,2	11,8	10,9	4,8	4,7	439,2
30	12,1	12,7	12,8	11,5	12,3	5,4	5,3	491,3
31	13,2	13,6	12,1	11,2	12,5	5,4	5,3	495,5
32	10,2	9,8	12,2	11,9	11,0	5,3	5,2	485,7

Tabla A1.2.2 Registro de humedad y densidad probetas compresión

Probeta	Registro de Humedad Compresión				Densidad Probetas Compresión		
	lado 1 (%)	lado 2 (%)	lado 3 (%)	CH (%) promedio Probeta	Peso Total probeta (kg)	Peso sin clavos (kg)	Densidad Total probeta (kg/m ³)
1	11,6	11,7	11,5	11,6	3,4	3,4	456,8
2	13,8	11,4	13,4	12,9	4,0	3,9	529,5
3	13,5	13,6	12,1	13,1	3,8	3,8	505,9
4	13,2	12,2	10,2	11,9	3,6	3,6	484,4
5	10,8	11,4	9,7	10,6	3,5	3,5	471,0
6	11,8	12,7	10,1	11,5	3,4	3,4	452,1
7	13,5	9,8	11,5	11,6	3,6	3,6	477,7
8	10,5	10,7	9,5	10,2	3,3	3,3	440,0
9	10,4	12,2	10,0	10,9	3,3	3,2	436,7
10	10,2	10,1	10,7	10,3	3,2	3,1	420,5
11	8,8	11,1	10,9	10,3	3,3	3,3	437,3
12	10,7	11,5	10,2	10,8	3,4	3,4	454,1
13	10,4	10,1	10,9	10,5	3,4	3,4	451,5
14	10,0	9,4	9,5	9,6	3,2	3,1	422,5
15	11,9	12,7	13,0	12,5	3,7	3,6	489,8
16	13,5	12,9	12,5	13,0	4,0	4,0	538,9
17	10,8	13,4	11,4	11,9	3,6	3,6	483,1
18	11,6	11,9	11,4	11,6	3,8	3,8	504,6
19	11,7	11,9	11,9	11,8	3,8	3,7	503,9
20	12,4	12,3	12,3	12,3	3,9	3,8	515,4
21	11,6	12,5	12,3	12,1	3,7	3,7	491,8
22	12,7	12,9	12,8	12,8	3,8	3,8	507,3
23	12,5	12,5	10,9	12,0	3,6	3,6	481,1
24	12,2	9,5	9,4	10,4	3,3	3,3	444,1
25	10,9	11,6	10,7	11,1	3,4	3,4	456,8
26	10,0	12,4	12,9	11,8	3,8	3,7	503,9
27	11,9	12,6	11,9	12,1	3,7	3,7	499,9
28	10,8	9,5	9,4	9,9	3,3	3,3	439,3
29	10,0	10,1	11,9	10,7	3,5	3,5	464,2
30	10,7	13,2	13,0	12,3	3,8	3,8	508,6

ANEXO 1.3 Acomodo inicial curvas

En la figura izquierda se muestra una curva azul que presenta un desplazamiento o acomodo inicial. Para el análisis de las curvas, se les retira el acomodo inicial (Δ acomodo), desplazando las curvas al origen, para tener una base de referencia común. La curva naranja muestra la misma curva sin el acomodo inicial y desplazada al origen.

La figura derecha, presenta la misma curva con acomodo y sin acomodo, sin aplicar aumento de escala, lo que permite apreciar el desplazamiento global de la curva. Cabe destacar que, para determinar la deformación máxima alcanzada en los ensayos, se debe considerar el acomodo inicial.

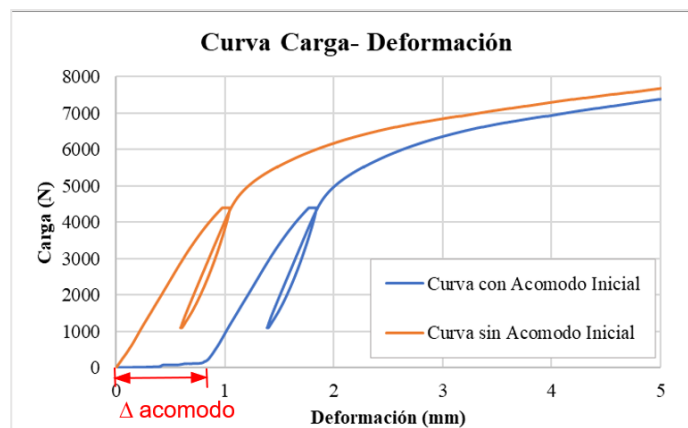


Figura A1.3.1 Curva con acomodo inicial y sin acomodo inicial. (con aumento de escala)

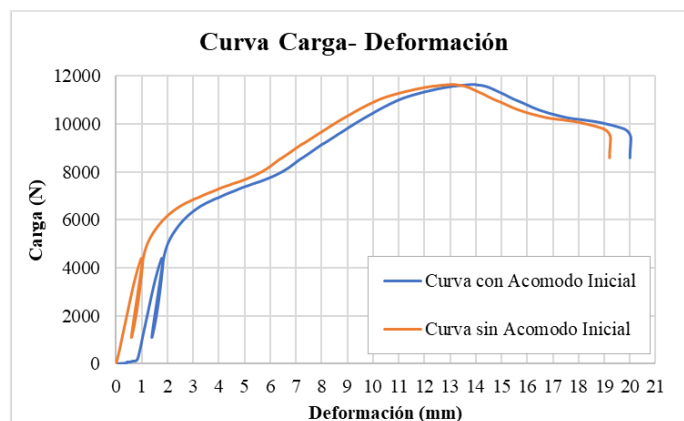


Figura A1.3.2 Curva con acomodo inicial y sin acomodo inicial. (sin aumento de escala)

ANEXO 1.4 Referencias a norma EN 26891-199

La figura A1.4.1 muestra los cálculos asociados a la norma EN26891

8.5 Calculations	
From the recorded measurements, the following values, if relevant, shall be determined for each test:	
1) maximum load	F_{\max}
2) estimated maximum load	F_{est}
3) initial slip	$v_i = v_{04}$
4) modified initial slip	$v_{i,\text{mod}} = \frac{4}{3}(v_{04} - v_{01})$
5) joint settlement ^a	$v_s = v_i - v_{i,\text{mod}}$
6) elastic slip	$v_e = \frac{2}{3}(v_{14} + v_{24} - v_{11} - v_{21})$
7) initial slip modulus	$k_i = 0,4 F_{\text{est}}/v_i$
8) slip modulus	$k_s = 0,4 F_{\text{est}}/v_{i,\text{mod}}$
9) slip at 0,6 F_{\max}	$v_{0,6}$
10) modified slip at 0,6 F_{\max}	$v_{0,6,\text{mod}} = v_{0,6} - v_{24} + v_{i,\text{mod}}$
11) slip at 0,8 F_{\max}	$v_{0,8}$
12) modified slip at 0,8 F_{\max}	$v_{0,8,\text{mod}} = v_{0,8} - v_{24} + v_{i,\text{mod}}$

Figura A1.4.1 Cálculos apartado 8.5 norma EN 26891-1991

Fuente: EN 26891-1991

ANEXO 1.5 Cálculo de la capacidad de diseño que puede transmitir la unión.

La capacidad admisible de medios de unión mecánicos de forma cilíndrica está sujeta a la distinción entre una unión de cizallamiento simple o doble. En función de esta distinción, se procede al cálculo de los modos de fluencia o de falla respectivos. La capacidad admisible resultante es el valor más bajo entre las capacidades estimadas por cada modo de falla aplicable según corresponda. La figura A1.5.1 muestra la distinción entre clavos en cizalle simple y cizalle doble, donde: p: Penetración del clavo en el madero que recibe su punta.

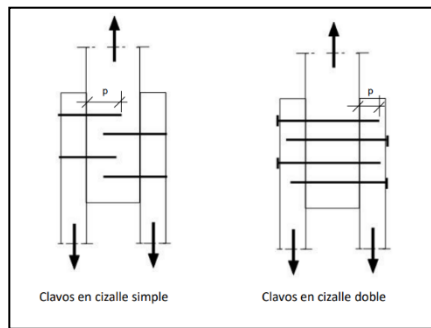


Figura A1.5.1 clavos en cizalle simple y cizalle doble.

A continuación, en la figura A1.5.2, se muestran los posibles modos de falla para cizalle simple y doble, según figura 37, NCh1198

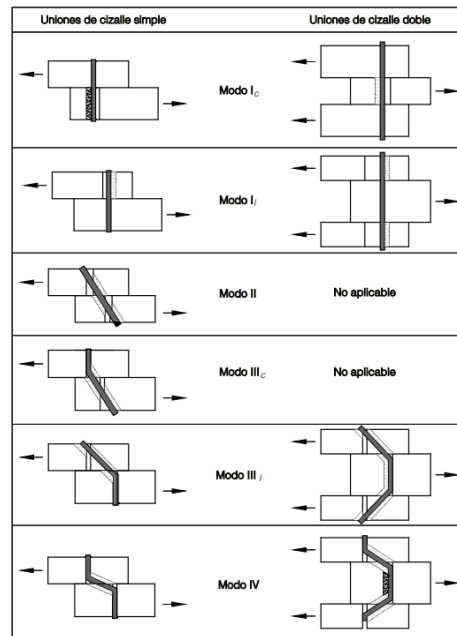


Figura A1.5.2 Modos de fluencia en uniones de madera con elementos de fijación mecánicos
Fuente: NCh1198

La tabla A1.5.1 muestra las ecuaciones para la capacidad admisible de cada modo de falla para cizalle simple y doble, de acuerdo con tabla 35, NCh 1198

Tabla A1.5.1 Modelo de fluencia para medios de unión solicitados en extracción lateral.

Modo de falla	Uniones Cizalle Simple	Uniones Cizalle Doble
<i>modo I_c</i>	$P_{el,ad} = \frac{D \cdot l_c \cdot R_{ap,c}}{FA}$	$P_{el,ad} = \frac{D \cdot l_c \cdot R_{ap,c}}{FA}$
<i>modo I_l</i>	$P_{el,ad} = \frac{D \cdot l_l \cdot R_{ap,l}}{FA}$	$P_{el,ad} = \frac{2D \cdot l_l \cdot R_{ap,l}}{FA}$
<i>modo II</i>	$P_{el,ad} = \frac{k_1 \cdot D \cdot l_l \cdot R_{ap,l}}{FA}$	No aplicable
<i>modo III_c</i>	$P_{el,ad} = \frac{k_2 \cdot D \cdot l_c \cdot R_{ap,c}}{(1 + 2R_e) \cdot FA}$	No aplicable
<i>modo III_l</i>	$P_{el,ad} = \frac{k_3 \cdot D \cdot l_l \cdot R_{ap,c}}{(2 + R_e) \cdot FA}$	$P_{el,ad} = \frac{2 \cdot k_3 \cdot D \cdot l_l \cdot R_{ap,c}}{(2 + R_e) \cdot FA}$
<i>modo IV</i>	$P_{el,ad} = \frac{D^2}{FA} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_{ap,c} \cdot F_{ff}}{3 \cdot (1 + R_e)}}$	$P_{el,ad} = \frac{2 \cdot D^2}{FA} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_{ap,c} \cdot F_{ff}}{3 \cdot (1 + R_e)}}$

Donde:

$P_{el,ad}$: Capacidad de carga admisible (N)

D : diametro nominal del medio de unión (mm)

l_c : largo del sujetor en madera central (mm)

l_l : largo del sujetor en madera lateral (mm)

$R_{ap,c}$: Resistencia de aplastamiento del vástago en el madero principal, según 9.6.2.2 NCh 1198 (MPa)

$R_{ap,l}$: Resistencia de aplastamiento del vástago en el madero secundario, según 9.6.2.2 NCh 1198 (MPa)

F_{ff} : tensión de fluencia en flexión del acero, según 9.6.2.3 NCh1198 (MPa)

FA : Factor de Ajuste según tabla 36 norma NCh1198

$$R_e = \frac{R_{ap,c}}{R_{ap,l}} \quad (A1.4.1)$$

$$R_t = \frac{l_c}{l_l} \quad (A1.4.2)$$

$$k_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2 \cdot (1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 \cdot R_e^3 - R_e \cdot (1 + R_t)}}{1 + R_e} \quad (\text{A1.4.3})$$

$$k_2 = -1 + \sqrt{2 \cdot (1 + R_e) + \frac{2 F_{ff} \cdot (1 + 2R_e) \cdot D^2}{3 \cdot R_{ap,c} \cdot l_c^2}} \quad (\text{A1.4.4})$$

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + R_e)}{R_e} + \frac{2 F_{ff} \cdot (2 + R_e) \cdot D^2}{3 \cdot R_{ap,c} \cdot l_l^2}} \quad (\text{A1.4.5})$$

1.5.1 Determinación de tipo de cizalle:

Tanto para el ensayo a tracción como el ensayo a compresión realizado, se determina la penetración del clavo en el madero que recibe su punta de la siguiente forma:

e_l : espesor madero lateral = 41 mm

largo clavo = 75 mm

e_c : espesor madero central = 41 mm

p = largo clavo – e_l = 34 mm

Por tanto se tiene que el clavo penetra en el madero lateral y el madero central, teniendo un plano de corte, por lo que para los ensayos a tracción y compresión se trata de cizalle simple.

1.5.2 Estimación de Capacidad Admisible del clavo:

Ya que se tiene cizalle simple, la capacidad admisible del clavo viene dada de la siguiente manera:

$$P_{el,ad} = \min(I_c; I_l; II; III_c; III_l; IV) \quad (\text{A1.4.6})$$

A continuación, se estima la capacidad admisible según cada modo de falla, De acuerdo con los datos del ensayo, donde se tiene que:

$D = 2,8 \text{ mm}$

$l_l = 41 \text{ mm}$

$$\rho_0 = 475 \text{ kg/m}^3 \quad l_c = 34 \text{ mm}$$

$$R_{ap,c} = R_{ap,l} = 115 \cdot \left(\frac{\rho_0}{1000} \right)^{1,84} = 29,23 \text{ MPa} \quad (\text{A1.4.7})$$

$$F_{ff}(\text{para } D < 6,4\text{mm}) = 896 - 58 \cdot D = 733,6 \text{ MPa} \quad (\text{A1.4.8})$$

$$FA = 2,2 \quad k_1 = 0,382$$

$$R_e = 1 \quad k_2 = 1,083$$

$$R_t = 0,829 \quad k_3 = 1,058$$

Luego se tiene la capacidad admisible para cada modo de falla:

$$\text{modo } I_c: P_{el,ad} = 1264,8 \text{ N}$$

$$\text{modo } III_c: P_{el,ad} = 456,7 \text{ N}$$

$$\text{modo } I_l: P_{el,ad} = 1525,2 \text{ N}$$

$$\text{modo } III_l: P_{el,ad} = 537,7 \text{ N}$$

$$\text{modo } II: P_{el,ad} = 582,13 \text{ N}$$

$$\text{modo } IV: P_{el,ad} = 301,28 \text{ N}$$

Así, la capacidad admisible de un sujetor corresponde a:

$$P_{el,ad} = 301,28 \text{ N}$$

1.5.3 Estimación de Capacidad de diseño:

La capacidad de diseño viene dada por la siguiente fórmula:

$$P_{el,dis} = P_{el,ad} \cdot K_D \cdot K_{UH} \cdot K_{UT} \cdot K_u \quad (\text{A1.4.9})$$

Donde:

K_D : Factor de modificación por duración de carga, 9.4.2 NCh1198

K_{UH} : Factor de modificación por contenido de humedad de la madera, 9.4.3 NCh1198

K_{UT} : Factor de modificación por temperatura, 9.4.4 NCh1198

K_u : Factor de modificación por longitud de hilera, 9.4.5 NCh1198

$$K_D = 1 \quad K_{UT} = 1$$

$$K_{UH} = 0,7 \quad K_u = 1$$

Tal como se señaló en el punto 4.2, las probetas estaban secas, por lo que no hay castigo en el factor de modificación por humedad propiamente tal, sin embargo el punto 9.4.3 de la norma indica que el factor se reduce a 0,7 cuando los medios de unión tienen un diámetro menor que 6,3 mm . Luego, considerando los factores de modificación estimados según indica la norma, se tiene que la capacidad de diseño que puede transmitir un clavo es:

$$P_{el,dis} = 210,9 N$$

Luego, la capacidad de diseño que puede transmitir la unión de 8 clavos es:

$$P_{dis,unión} = Cantidad\ de\ clavos \cdot P_{el,dis} = 1681,2 N \quad (A1.4.10)$$

ANEXO 1.6 Referencias a norma EN 408:2010

La figura A1.6.1 muestra la determinación del módulo de elasticidad local en flexión de acuerdo con el punto 9.3 de la norma.

9.3 Expresión de los resultados

Se traza el gráfico de carga/deformación utilizando los datos obtenidos del ensayo del módulo de elasticidad local.

Para un análisis de regresión se utiliza el tramo del gráfico comprendido entre $0,1 F_{\text{máx.,est}}$ y $0,4 F_{\text{máx.,est}}$.

Se busca el tramo más largo de esta sección que da un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor. Con la condición de que esta parte del gráfico incluya al menos el tramo comprendido entre $0,2 F_{\text{máx.,est}}$ y $0,3 F_{\text{máx.,est}}$ se calcula el módulo de elasticidad local con la fórmula siguiente:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)} \quad (1)$$

donde

$F_2 - F_1$ es el incremento de carga en newtons en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor, y

$w_2 - w_1$ es el incremento de deformación en milímetros correspondiente a $F_2 - F_1$, (véase la figura 2).

El módulo de elasticidad local $E_{m,l}$ debe calcularse con una precisión del 1%.

Si no se puede encontrar una parte del gráfico con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor que incluya el tramo comprendido entre $0,2 F_{\text{máx.,est}}$ y $0,3 F_{\text{máx.,est}}$, se verifica el dispositivo de carga y se toman las medidas adecuadas para eliminar los errores provocados por muestras deformadas. Si sigue sin alcanzarse el 0,99, se rechaza la muestra.

Figura A1.6.1. Cálculo de módulo de elasticidad local, EN408:2010

Donde:

a : distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión, en milímetros.

l_1 : longitud base medida, utilizada para la determinación del módulo de elasticidad longitudinal o transversal, en milímetros.

I : momento de inercia en milímetros elevados a la cuarta potencia.

La figura A1.6.2 muestra la determinación del módulo de elasticidad global en flexión de acuerdo con el punto 10.3 de la norma.

Donde:

l : luz en flexión, en milímetros.

10.3 Expresión de los resultados

Se utiliza el tramo del gráfico comprendido entre $0,1 F_{\text{máx.,est}}$ y $0,4 F_{\text{máx.,est}}$ para el análisis de regresión.

Se busca el tramo más largo de esta sección que da un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor. Con la condición de que esta parte del gráfico incluya al menos el tramo comprendido entre $0,2 F_{\text{máx.,est}}$ y $0,3 F_{\text{máx.,est}}$ se calcula el módulo de elasticidad global con la fórmula siguiente:

$$E_{\text{m,g}} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (2)$$

donde

$\{A1 \blacktriangleright\} F_2 - F_1$ es el incremento de carga sobre la línea de regresión en newtons, con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor; y

$w_2 - w_1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en milímetros (véase la figura 2);

G es el módulo de elasticidad transversal determinado por el método indicado en el apartado 11.1 o en el apartado 11.2.

El módulo de elasticidad transversal G debe tomarse como infinito cuando se utilice la fórmula (2) según la Norma EN 384 para la determinación de la clase resistente.

Figura A1.6.2 Cálculo de módulo de elasticidad global, EN408:2010

ANEXO 1.7 Gráficos ensayos uniones

1.7.1 Gráficos Curvas Tracción

La figura A1.7.1.1 muestra las curvas en bruto de los ensayos a tracción, teniendo carga vs deformación 2Δ , según lo señalado en apartado 3.5

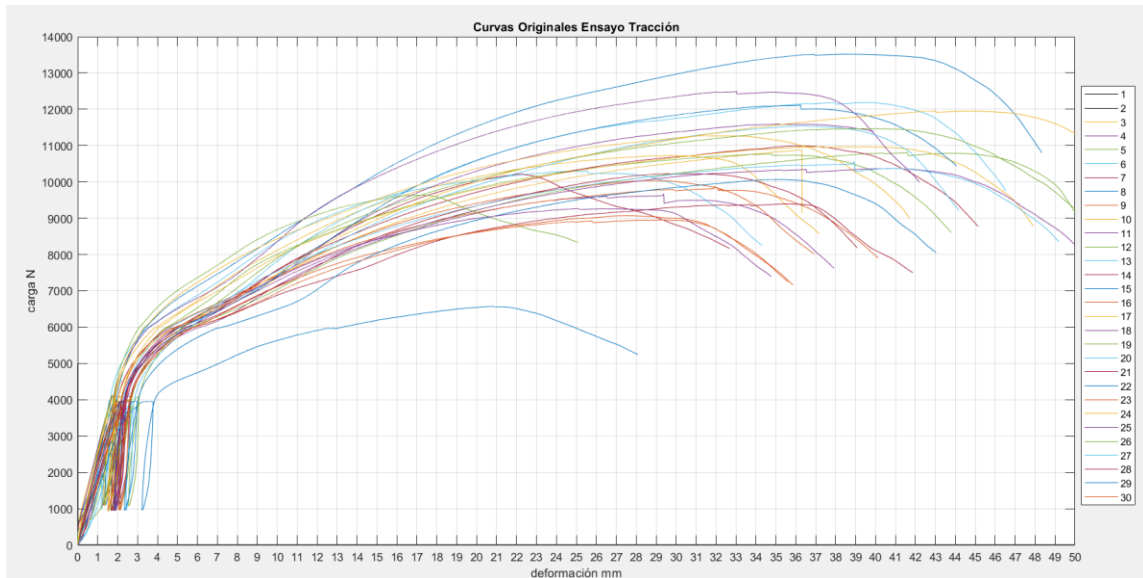


Figura A1.7.1.1 Curvas Carga vs Deformación (2Δ)

La figura A1.7.1.2 muestra las curvas ajustadas de los ensayos a tracción, teniendo carga vs deformación, según lo señalado en apartado 3.5

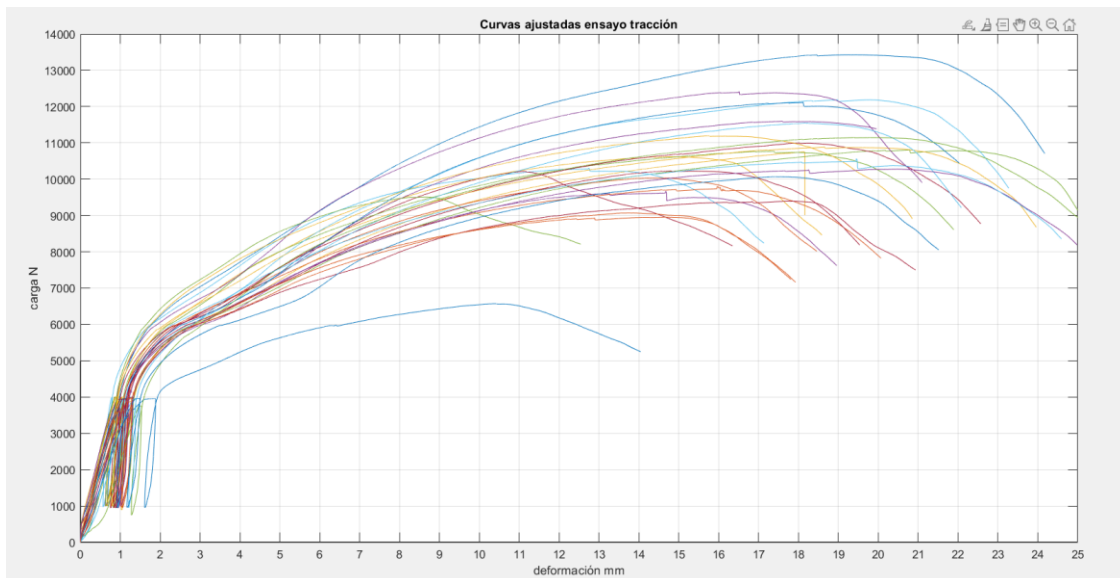


Figura A1.7.1.2 Curvas ajustadas, Carga vs Deformación (Δ)

1.7.2 Gráficos curvas compresión

La figura A1.7.2.1 muestra las curvas en bruto de los ensayos a compresión, considerando el acomodo inicial de las curvas. La figura A1.7.2.2 muestra las curvas de los ensayos a compresión sin el acomodo inicial.

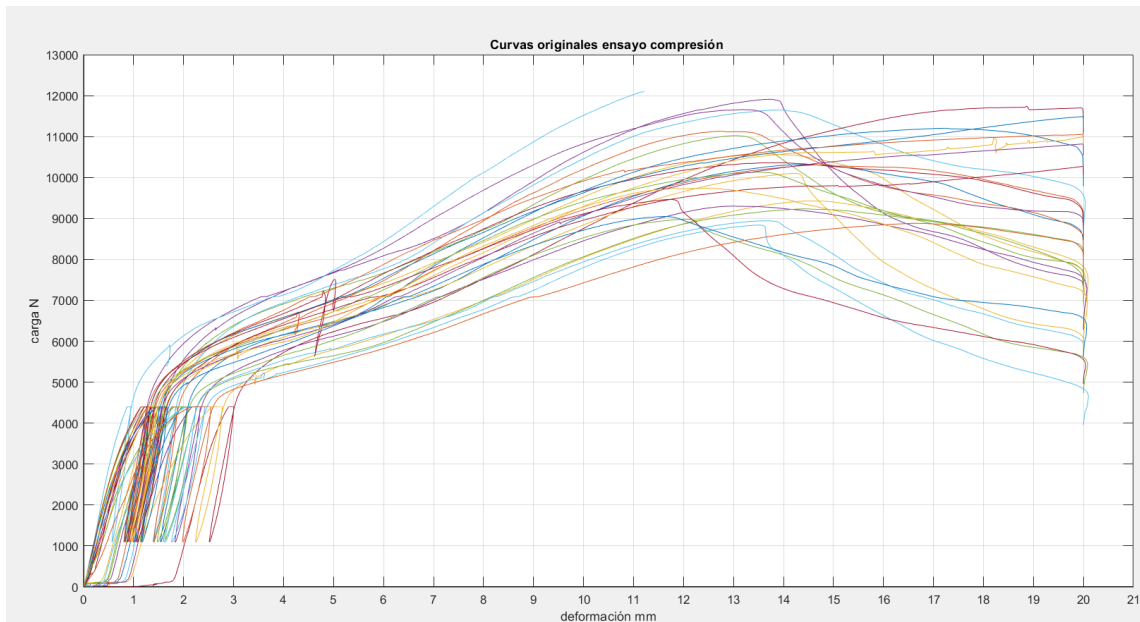


Figura A1.7.2.1 Curvas carga vs deformación compresión originales, considerando acomodo.

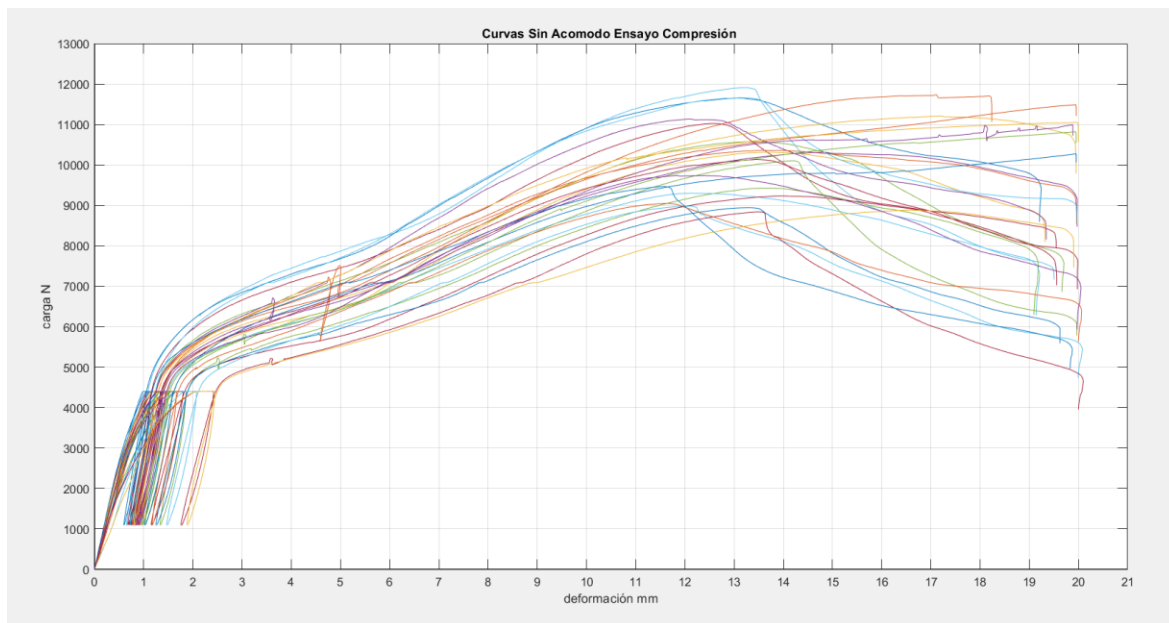


Figura A1.7.2.2 Curvas carga vs deformación compresión modificadas, sin acomodo.

1.7.3 Gráfico Curvas Carga- Deformación ensayos Compresión y ensayos Tracción.

La figura A1.7.3.1 muestra las curvas Carga- Deformación de ensayo a tracción y compresión, considerando la deformación original (2Δ) que entregan los datos en el ensayo a tracción.

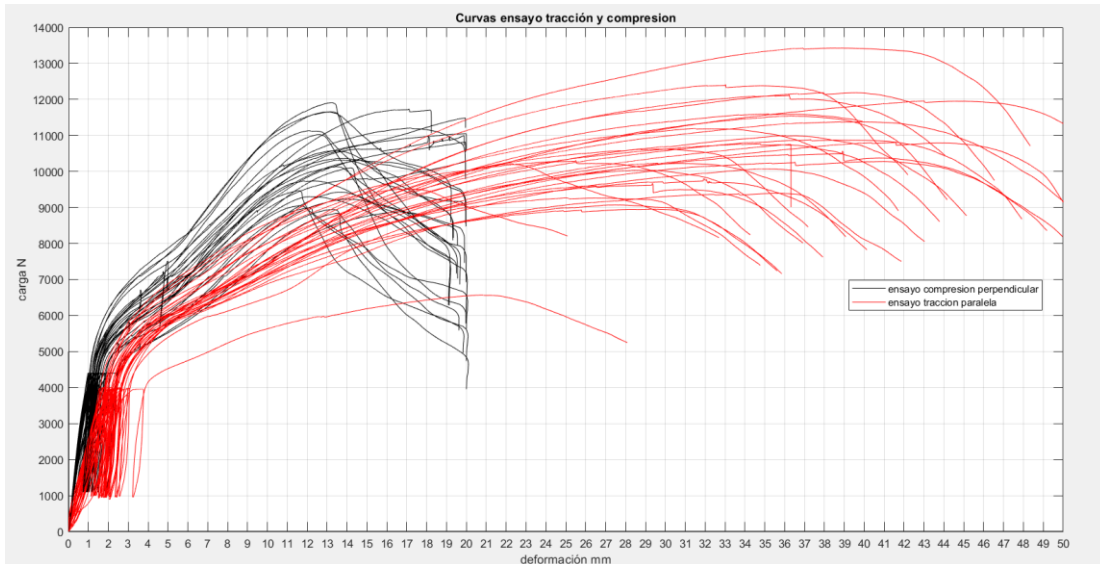


Figura A1.7.3.1 Curvas tracción original vs Curvas compresión.

La figura A1.7.3.2 muestra las curvas Carga- Deformación de ensayo a tracción y compresión, considerando la deformación ajustada (Δ) para el ensayo a tracción.

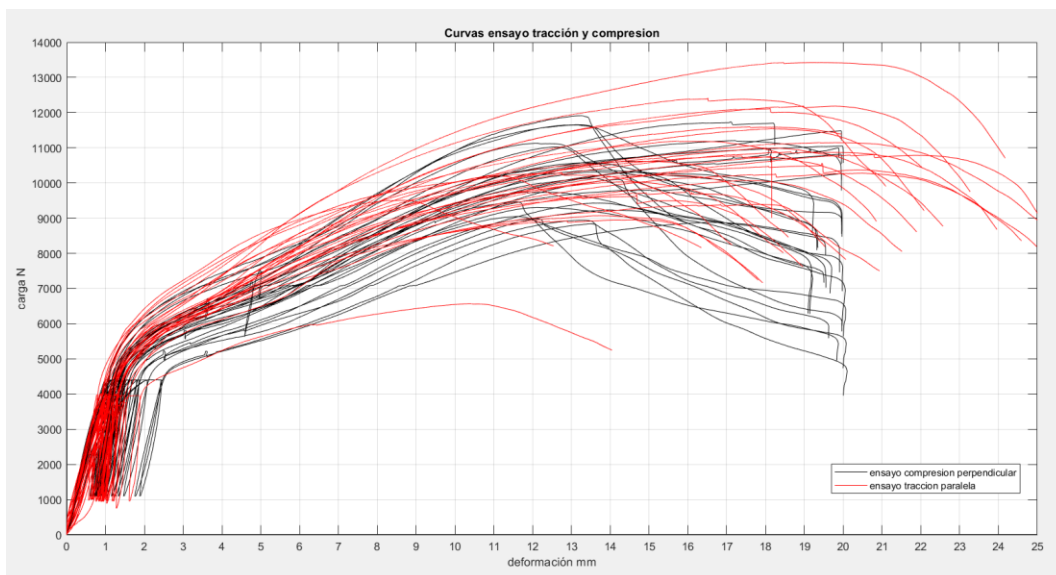


Figura A1.7.3.2 Curvas tracción ajustada vs Curvas compresión.

1.7.4 Gráfico Curva Promedio Carga- Deformación Tracción

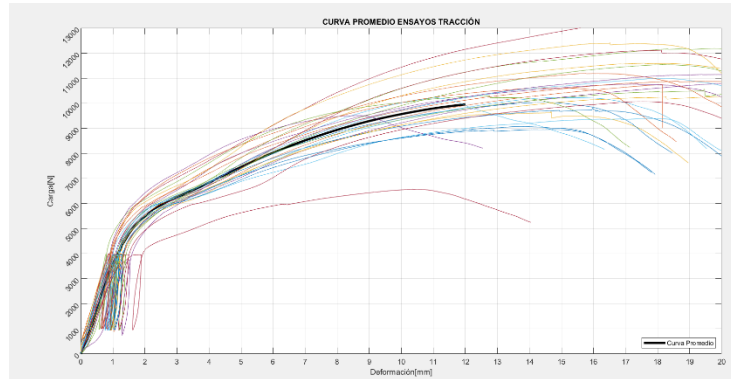


Figura A1.7.4.1 Curva Promedio Carga- Deformación Tracción

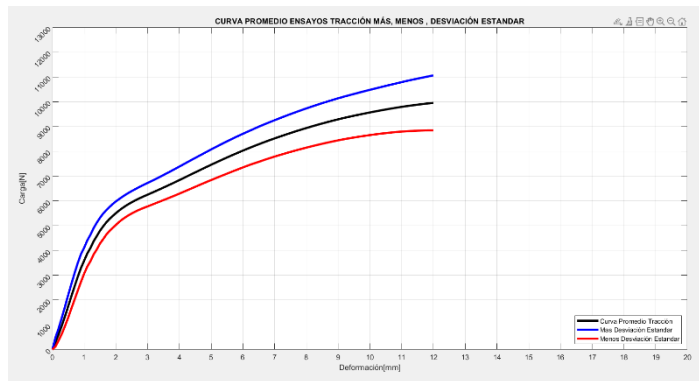


Figura A1.7.4.2 Curva promedio tracción, curva promedio más desviación estándar, curva promedio menos desviación estándar

La figura A1.7.4.2 muestra las curvas de los ensayos a tracción, junto con la curva promedio y la envolvente de la curva promedio \pm desviación estándar.

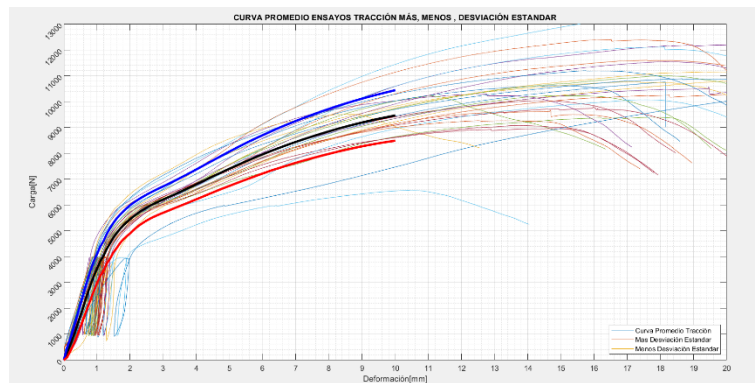


Figura A1.7.4.2 Curvas ensayos a tracción, curva promedio tracción, y envolvente de la curva promedio \pm desviación estándar

1.7.5 Gráfico Curva Promedio Carga- Deformación compresión

Para estimar la curva promedio en compresión, se excluye un curva (curva 18 registrada en los datos) se aleja de la tendencia al finalizar de forma abrupta, por tanto, los análisis se realizan para 28 curvas. La Figura A1.7.5.1 muestra la curva promedio de los ensayos a compresión.

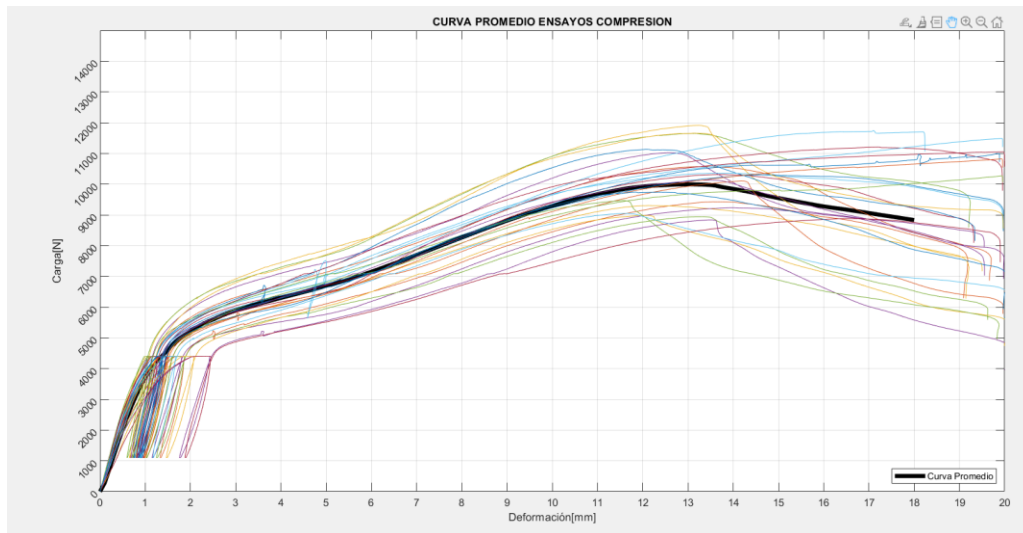


Figura A1.7.5.1 Curva Promedio Carga- Deformación Compresión

La figura A1.7.5.2 presenta la curva promedio de compresión, junto con la curva que incluye una desviación estándar superior al promedio y otra que incorpora una desviación estándar inferior al promedio.

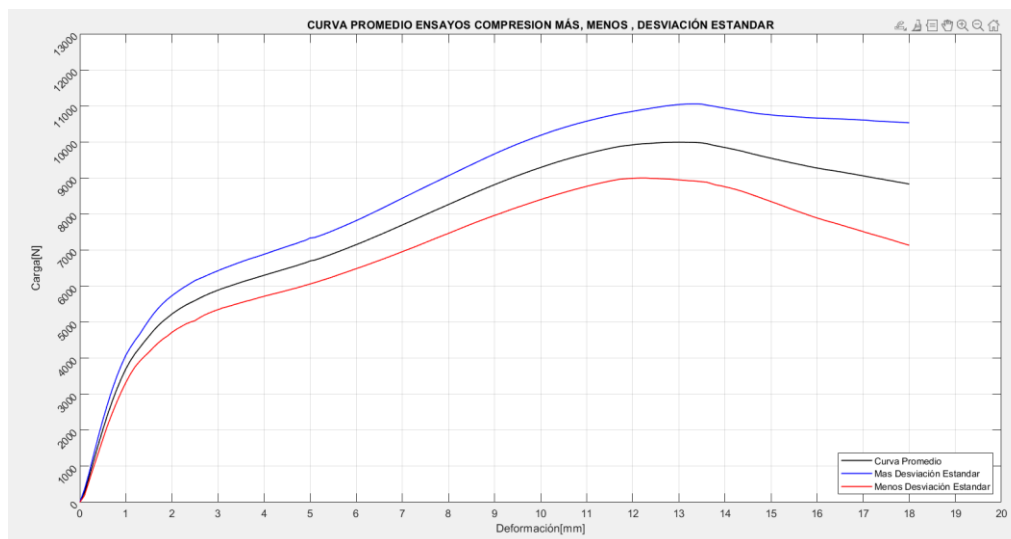


Figura A1.7.5.2 Curva Promedio Compresión, Curva promedio más desviación estándar, Curva Promedio menos Desviación estándar

La figura A1.7.5.3 muestra las curvas de los ensayos a compresión, junto con la curva promedio y la envolvente de la curva promedio \pm desviación estándar.

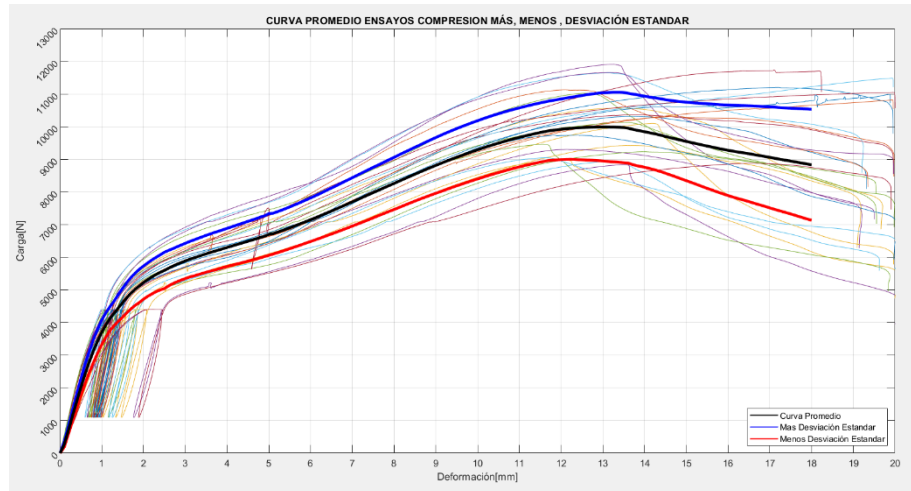


Figura A1.7.5.3 Curvas ensayos a compresión, Curva Promedio Compresión, y envolvente de la curva promedio \pm desviación estándar

1.7.6 Gráfico Curva Promedio Carga- Deformación compresión y tracción

La figura A1.7.6.1 muestra juntas la curva promedio de los ensayos a tracción y de los ensayos a compresión.

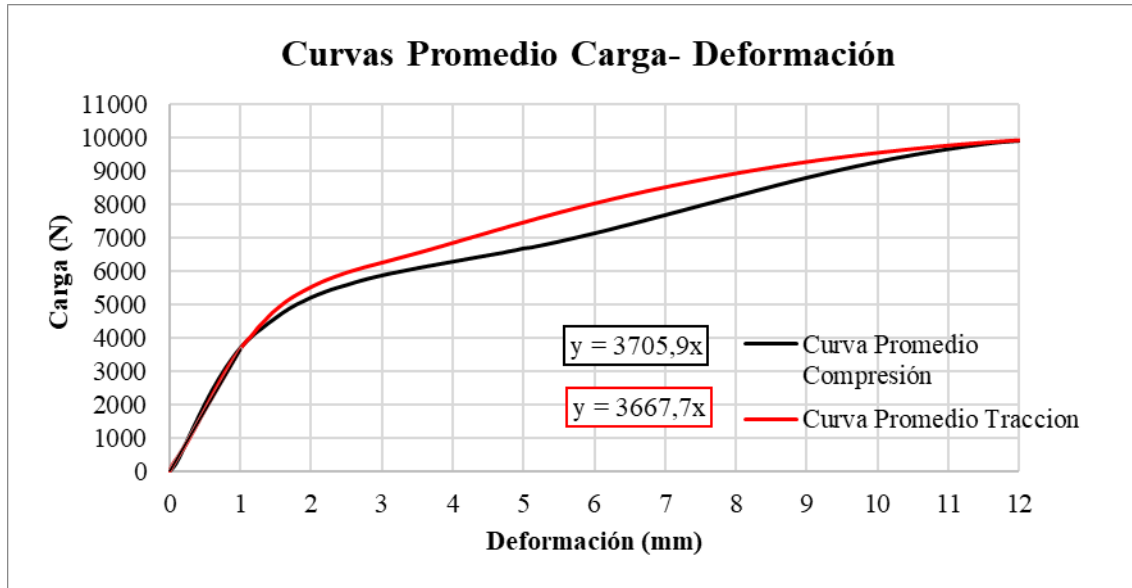


Figura A1.7.6.1 Gráfico Curva Promedio Carga- Deformación Compresión y Tracción.

ANEXO 1.8 Resultados de Ensayos de vigas NLT

A continuación se presentan los resultados de módulo de elasticidad global y local (N/mm), rigidez en flexión de la viga global y local (kN*m), fuerza máxima alcanzada en (kN) y momento flector para la carga máxima (kN*m), para las viga en laminación vertical continuas en la tabla A1.8.1 y vigas en laminación vertical con empalmes en la tabla A1.8.2. Los resultados se obtienen según lo indicado en el anexo 1.6.

Tabla A1.8.1 Resultados para vigas en laminación vertical continuas.

LAMINACIÓN VERTICAL						
Viga continua						
viga	MOE Global (N/mm ²)	EI global (kN*m ²)	MOE Local (N/mm ²)	EI local (kN*m ²)	Fmáx (kN)	Momento Flector (kN*m)
1	10344	1065	12294	1266	93,3	51,0
2	8693	895	15347	1581	93,4	51,0
3	9608	990	11546	1189	91,7	50,1
4	8460	871	12199	1256	87,3	47,7
5	11757	1211	13683	1409	88,8	48,5

Tabla A1.8.2 Resultados para vigas en laminación vertical con empalmes.

LAMINACIÓN VERTICAL						
Viga empalmes						
viga	MOE Global (N/mm ²)	EI global (kN*m ²)	MOE Local (N/mm ²)	EI local (kN*m ²)	Fmáx (kN)	Momento Flector (kN*m)
1	8038	828	5132	529	74,8	40,8
2	7391	761	6115	630	94,4	51,5
3	8362	861	6068	625	68,3	37,3
4	8396	865	7924	816	51,1	27,9
5	7282	750	6207	639	76,2	41,6

A continuación, se presentan los resultados de módulo de elasticidad global y local (N/mm), rigidez en flexión de la viga global y local (kN*m), para las vigas en laminación horizontal continuas y vigas en laminación horizontal con empalmes en la tabla A1.8.3.

Tabla A1.8.3 Resultados para vigas en laminación horizontal continua y con empalmes.

viga	LAMINACIÓN HORIZONTAL							
	continua				empalmes			
	MOE Global (N/mm ²)	EI global (kN*m ²)	MOE Local (N/mm ²)	EI local (kN*m ²)	MOE Global (N/mm ²)	EI global (kN*m ²)	MOE Local (N/mm ²)	EI local (kN*m ²)
1	2756	284	2959	305	3288	339	2950	304
2	2378	245	3045	314	2798	288	2957	305
3	2935	302	2431	250	3215	331	3180	327
4	2755	284	3880	400	3423	353	2846	293
5	x	x	x	x	3139	323	2829	291

ANEXO 1.9 Códigos Matlab utilizados

La figura A1.9.1 muestra el código utilizado para obtener la curva promedio a compresión, se utiliza el mismo código para obtener la curva promedio a tracción utilizando los datos correspondientes a dicho ensayo.

```

1  clc, clear all, close all, format long %v2
2  tic
3  DD = cell(28,1);
4  CC = cell(28,1);
5
6  CC(28)=xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','B46:B47200');
7  DD(28)=xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','B66:B67200');
8  DD(27)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','B66:B67200');
9  CC(27)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','B66:B67200');
10 DD(26)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','B66:B67200');
11 CC(26)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','B66:B67200');
12 DD(25)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','B66:B67200');
13 CC(25)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','B66:B67200');
14 DD(24)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
15 CC(24)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
16 DD(23)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
17 CC(23)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
18 DD(22)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
19 CC(22)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
20 DD(21)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
21 CC(21)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
22 DD(20)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
23 CC(20)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
24 %DD(21)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200'); %
25 %CC(21)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200'); %
26 DD(19)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A66:A67200');
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66 N=28; % cantidad de curvas
67 M=0.1:0.1:18; % largo de la curva promedio % si cambio acá cambiar def2
68
69 for i=1:N %
70     L(i) = length( DD{i});
71 end
72 R=cell(2,1); % POSICIONES "i esimas" para recorrer cada vector % el primero es el total % el
73 for i=1:N % cantidad de curvas
74     R(i)=L(i);
75 end
76 CP=cell(2,1); % (??) curva 1 Punto 1, Curva 2 Punto 2... % i representa la cantidad de c
77 for i=1:N
78     for j=1:length(M) %
79         LL(R{i})=abs(M(j)-DD{i}); % encontrar la posición del nivel de deformacion
80         CP{i,j}=LL;
81     end
82 end
83 CPM=cell(2,1);
84 for i=1:N
85     for j=1:length(M) %
86         CPM{i,j}=find(CP{i,j} <= 0.05);
87     %
88     end
89 end
90 PNCM=cell(2,1); % Aca indicamos cual es la carga para cada deformación para curva 1
91 for i=1:N
92     PNCM=cell(2,1); % Aca indicamos cual es la carga para cada deformación para curva 1
93     for i=1:N
94         for j=1:length(M) %
95             PNCM{i,j}=CC{i}(CPM{i,j}(1)); % ese (1) indica que se toma el primer valor de este vec
96         end
97     end
98     CM=cell(2,1);
99     for i=1:length(M) %
100        CM{i,1}=mean(cell2mat(PNCM(1:N,i))); % Aca creo que va el total del nivel de deformacion
101    end
102    def2=[0:0.1:18]; %%% acá la def va hasta el largo de la curva, si cambio arriba deberia camb
103    CProm=[0 ; cell2mat(CM)];
104    grid minor
105
106    plot(def2,CProm,'k','LineWidth',4,'DisplayName','Curva Promedio')
107    hold on
108    legend('AutoUpdate','off','Location','southeast')
109    for i=1:N
110        plot(DD{i},CC{i})
111    end
112
113    xlim([0 20])
114    ylim([0 15000])
115    xticks([0:1:50])
116    yticks([0:1000:14000])
117
118    grid on
119    ax=gca;
120    ax.YAxis.Exponent=0;
121    ytickangle(45)
122    xlabel('Deformación[mm]'), ylabel('Carga[N]')
123    title('CURVA PROMEDIO ENSAYOS COMPRESION')
124    toc

```

Figura A1.9.1 Código para obtener curva carga-deformación promedio.

La figura A1.9.2 muestra el código utilizado para obtener puntos de interés en curvas carga-deformación.

```

1  clc, clear all, close all, format long %v3
2
3  def = xlsread('Curvas_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A16:A170100');
4  carga = xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','A16:A170100');
5  fest = 11000;
6  % USO, def = xlsread('NOMBRE-EXCEL.xlsx','NOMBRE-HOJA','CELDAS'); %
7  fmax=max(carga);
8  for i=1:length(carga)-1
9      delta(i)=abs(carga(i+1)-carga(i));
10
11     delta=delta';
12     %cant datos
13     if length(delta) > 16500
14         flag = 0.1;
15     else
16         flag = 1;
17     end
18     for i=1:length(delta)
19         if delta(i) < flag
20             aux(i) = 1;
21         else
22             aux(i) = 0;
23         end
24     end
25
26     aux=aux';
27
28     i=1;
29     while aux(i) == 1 || aux(i+1) == 1 || aux(i+2) == 1 || aux(i+3) == 1 || aux(i+4) == 1 || aux(i+5) == 1 ||
30         i=i+1;
31     end
32
33     i2=0;
34     while aux(i+i2) == 0 || aux(i+i2+1) == 0 || aux(i+i2+2) == 0 || aux(i+i2+3) == 0 || aux(i+i2+4) == 0 ||
35         i2=i2+1;
36     end
37
38     i3=0;
39     while aux(i+i2+i3) == 1 || aux(i+i2+i3+1) == 1 || aux(i+i2+i3+2) == 1 || aux(i+i2+i3+3) == 1 || aux(i+i2-
40         i3=i3+1;
41     end
42
43     i4=0;
44     while aux(i+i2+i3+i4) == 0 || aux(i+i2+i3+i4+1) == 0 || aux(i+i2+i3+i4+2) == 0 || aux(i+i2+i3+i4+3) == 0
45         i4=i4+1;
46     end
47
48     i5=0;
49     while aux(i+i2+i3+i4+i5) == 1 || aux(i+i2+i3+i4+i5+1) == 1 || aux(i+i2+i3+i4+i5+2) == 1 || aux(i+i2+i3+i-
50         i5=i5+1;
51     end
52
53     end
54
55     P00=[0,0];
56     P04=[def(i2+i), carga(i2+i)];
57     P14=[def(i3+i2+i), carga(i3+i2+i)];
58     P11=[def(i4+i3+i2+i), carga(i4+i3+i2+i)];
59     P21=[def(i5+i4+i3+i2+i), carga(i5+i4+i3+i2+i)];
60
61     P01_estim=0.5*(P11(2)+P21(2));
62     P24_estim=0.5*(P04(2)+P14(2));
63
64     for k = 1:(i2+i)
65         if abs(carga(k)-P01_estim) < 3
66             P01=[def(k), carga(k)];
67         end
68     end
69
70     for k2 = (i5+i4+i3+i2+i):length(aux)
71         if abs(P24_estim-carga(k2)) < 3
72             P24=[def(k2), carga(k2)];
73         end
74     end
75
76     P26_estim=fmax*0.6;
77     P28_estim=fmax*0.8;
78
79     for k3 = (i5+i4+i3+i2+i):length(aux)
80         if abs(P26_estim-carga(k3)) < 3
81             P26=[def(k3), carga(k3)];
82         end
83     end
84
85     for k4 = (i5+i4+i3+i2+i):length(aux)
86         if abs(P28_estim-carga(k4)) < 2
87             P28=[def(k4), carga(k4)];
88         end
89     end
90
91     %%%%%% OUTPUTS %%%%%%%%%%%%%%%
92     P00
93     P01
94     P04
95     P14
96     P11
97     P21
98     P24
99     P26
100    P28
101
102    plot(def, carga)
103    hold on
104    grid on
105    xlim([min(def), P26(1)*1.1])
106    ylim([min(carga), P26(2)*1.1])
107
108    plot(P00(1),P00(2),'r','linewidth',5)
109    plot(P01(1),P01(2),'r','linewidth',5)
110    plot(P04(1),P04(2),'r','linewidth',5)
111    plot(P14(1),P14(2),'r','linewidth',5)
112    plot(P11(1),P11(2),'r','linewidth',5)
113    plot(P21(1),P21(2),'r','linewidth',5)
114    plot(P24(1),P24(2),'r','linewidth',5)
115    plot(P26(1),P26(2),'r','linewidth',5)
116    plot(P28(1),P28(2),'r','linewidth',5)
117
118    text(P00(1),P00(2),'P00')
119    text(P01(1),P01(2),'P01')
120    text(P04(1),P04(2),'P04')
121    text(P14(1),P14(2),'P14')
122    text(P11(1),P11(2),'P11')
123    text(P21(1),P21(2),'P21')
124    text(P24(1),P24(2),'P24')
125    text(P26(1),P26(2),'P26')
126    text(P28(1),P28(2),'P28')
127

```

Figura A1.9.2 Código para obtener puntos de interés de norma EN26891-1991

La figura A1.9.3 muestra el código utilizado para obtener la curva promedio, y la desviación estándar para cada punto de carga, además se grafica la curva promedio más y menos la desviación estándar. El procedimiento se repite para el ensayo a compresión y tracción utilizando los datos que correspondan para cada uno.


```

1  clc, clear all, close all, format long %v2
2  tic
3  DD = cell(28,1);
4  CC = cell(28,1);
5  N=28; % cantidad de curvas
6  M=0:1:15; % largo de la curva promedio %
7  NV=5
8  def2=[0:0.1:5]; %%
9
10 CC(28)=xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','BH6:BH7200');
11 DD(28)=xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','BG6:BG7200');
12 DD(27)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','BE6:BE7200');
13 CC(27)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','BF6:BF7200');
14 DD(26)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','BC6:BC7200');
15 CC(26)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','BD6:BD7200');
16 DD(25)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','BA6:BA7200');
17 CC(25)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','BB6:BB7200');
18 DD(24)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','AY6:AY7200');
19 CC(24)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','AZ6:AZ7200');
20 DD(23)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','AW6:AW7200');
21 CC(23)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','AX6:AX7200');
22 DD(22)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','AU6:AU7200');
23 CC(22)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','AV6:AV7200');
24 DD(21)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','AS6:AS7200');
25 CC(21)= xlsread('Curvas_C_Modificadas.xlsx','curvas_matlab','AT6:AT7200');
71 for i=1:N %
72 L(i) = length( DD(i));
73 end
74 R=cell(2,1);% POSICIONES "i esimas" para recorrer cada vector%el primero es el total
75 for i=1:N %cantidad de curvas
76 R(i)=1:L(i);
77 end
78 CP=cell(2,1); % ) curva 1 Punto 1, Curva 2 Punto 2... % i representa la cantidad de
79 for i=1:N
80 for j=1:length(M) %%%%%%%%%%%%%%%
81 LL(R(i,j))=abs(M(j)-DD(i)); %encontrar la posicion del nivel de deformacion
82 CP(i,j)=LL; %
83 end
84 end
85 CPM=cell(2,1);
86 for i=1:N
87 for j=1:length(M) %%%%%%%%%%%%%%%
88 CPM(i,j)=find(CP(i,j) <= 0.05);
89 end
90 end
91 PNCMM=cell(2,1); %Aca indicamos cual es la carga para cada deformación para curva 1
92 for i=1:N
93 for j=1:length(M) %
94 PNCMM(i,j)=CC{i}(CPM(i,j)(1)); % ese (1) indica que se toma el primer valor de este
95 end
96 end
97 CM=cell(2,1);
98 for i=1:length(M) %%%%%%%%%%%%%%%
99 CM(i,1)=mean(cell2mat(PNCMM(1:N,i)));
100 end
101 CProm=[0 ; cell2mat(CM)];
102 grid minor
103 % (def2, CProm) grafica la curva promedio
104 plot(def2,CProm,'k','LineWidth',2,'DisplayName','Curva Promedio')
105 hold on
106 legend('AutoUpdate','off','Location','southeast')
107 xlim([0 20])
108 ylim([0 15000])
109 xticks([0:1:50])
110 yticks([0:1000:14000])
111 grid on
112 ax=gca;
113 ax.YAxis.Exponent=0;
114 ytickangle(45)
115 xlabel('Deformación[mm]'), ylabel('Carga[N]')
116 title('CURVA PROMEDIO ENSAYOS COMPRESION')
117 for i = 1:NV %cantidad de deformación
118 d(i) = PNCMM(:, i); %Crea un vector d(i) que almacena los valores de carga del nivel
119 end
120
121 for i = 1:NV %hasta la deformación
122 d(i) = [0; d(1, i)]; %Se ejecuta para cada nivel de deformación y agrega un 0 al pri
123 end
124 cPP=cPP(:,1);
125 PP = cell(1,1);
126 PP{1}=cPP;
127 Xprom = num2cell(cPP); % contiene en un vector el promedio de la carga de la curva para c
128
129 % Crear una celda para almacenar los vectores ajustados
130 A = cell(1, NV); % hasta la deformación NV
131 % Ajustar los vectores y almacenarlos en la celda A
132 for i = 1:NV
133 A(i) = [d(i)]; %cada A(i) contiene un vector d(i).
134 end
135
136 % Asignar los valores de A a las variables A1, A2, A3
137 % hasta la cantidad de curvas
138 % Asignar los valores de A a las variables A1, A2, A3, ... hasta la cantidad de curvas
139 for i = 1:NV
140 eval(['A', num2str(i), ' = A{i};']);
141 end
142 % Número de niveles de deformación
143 RE = cell(NV, 1);
144
145 for nivel = 1:NV
146 RE[nivel] = cell(size(A(nivel)));
147 for i = 1: numel(A(nivel))
148 RE[nivel]{i} = A(nivel){i} - Xprom[nivel + 1]; % +1 para compensar el indice 0
149 end
150 RE[nivel]{1} = 0; % Establece el primer elemento de la celda en 0
151 end
152 S = zeros(NV, 1);
153 for nivel = 1:NV
154 RnC = cellfun(@(x) x^2, RE[nivel], 'UniformOutput', false);
155 S(nivel) = sum(cellfun(@double, RnC));
156 end
157 VA = zeros(NV, 1);
158 DE = zeros(NV, 1);
159
160 DEE = [0:0.1:5];
161 DEE(nivel) = sqrt(VA(nivel));
162
163 def2=[1:0.1:NV] %ESTE DEBE SER DEL MISMO LARGO DE DEFORMACION (NV-1)
164 for nivel = 1:NV
165 VA(nivel) = S(nivel) / (N - 1);
166 DE(nivel) = sqrt(VA(nivel));
167 end
168 DESV=DE'
169 % Vector original
170 DESV1=[0 DESV]
171 % Elemento a agregar al comienzo
172 nuevo_elemento = 0;
173 % Agregar el nuevo elemento al comienzo del vector
174 def3 = cat(2, nuevo_elemento, def2);
175 plot(def3,DESV1,'r','LineWidth',2,'DisplayName','Curva Promedio')
176 plot(def3,DESV1,'o')
177
178 XpromMASDE = cell(size(CProm));
179 CDV=cell(size(DESV1));
180 for i = 1: numel(CProm)
181 XpromMASDE{i} = CProm{i} + DESV1{i};
182 end
183

```

Figura A1.9.3 Código para obtener curva promedio y su desviación estándar.

ANEXO 1.10 Estadística descriptiva

1.10.1 Promedio de los resultados

El promedio o media es una medida de tendencia central que se calcula sumando todos los valores en un conjunto de datos y dividiendo la suma por el número de observaciones. Representa el valor típico o promedio del conjunto analizado.

1.10.2 Valor mínimo

Es el valor más pequeño en el conjunto de datos. Representa el límite inferior de las observaciones y muestra cuán bajo puede ser un valor dentro del conjunto.

1.10.3 Valor máximo

Es el valor más grande en el conjunto de datos. Representa el límite superior de las observaciones y muestra cuán alto puede ser un valor dentro del conjunto.

1.10.4 Rango

El rango es una medida de la variabilidad en un conjunto de datos y se calcula como la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo en el conjunto. Proporciona información para mostrar cuán diferentes pueden ser los valores extremos observados en el conjunto.

1.10.5 Desviación estándar

La desviación estándar es una medida de dispersión que indica cuánto se desvían los valores individuales de un conjunto de datos respecto a la media. Cuanto mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos. Se utiliza para evaluar la consistencia o variabilidad en los valores del conjunto de datos.

1.10.6 Coeficiente de variación

El coeficiente de variación es una medida relativa de la variabilidad en un conjunto de datos. Se calcula como la desviación estándar dividida por la media y se expresa como un porcentaje. El CV se utiliza para comparar la variabilidad relativa entre diferentes conjuntos de datos, especialmente cuando las escalas o unidades de medida son diferentes. Un CV más alto indica una mayor variabilidad en relación con el promedio. A menor CV se tiene mayor consistencia o uniformidad de los datos dentro del conjunto.

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

Departamento	: Departamento de Ingeniería Civil
Carrera	: Ingeniería Civil
Nombre del memorista	: Catalina Sofía Antonieta Velásquez Zapata
Título de la memoria	: Desarrollo de metodología de diseño y análisis de vigas laminadas clavadas
Profesor(es) Guía	: Rodrigo Silva Muñoz
Profesor(es) Revisor	: Patricio Cendoya Peter Dechent
Concepto	:
Calificación	:

Resumen

Las vigas laminadas clavadas y los pisos de madera clavados emergen como una solución para abordar desafíos habitacionales y ambientales simultáneamente. En este contexto su enfoque innovador destaca por ser una alternativa estructuralmente robusta, versátil y de fácil fabricación. Una primera fase de la investigación, que resulta de importancia para estudiar el comportamiento de vigas clavadas es conocer la ley carga deformación de los conectores individuales. Para ello se realizaron ensayos en probetas estandarizadas unidas con clavos, con carga en la dirección paralela y normal a la fibra, con lo cual se pudieron obtener resultados de rigidez y capacidad de los conectores. Los resultados indican similitudes entre los módulos obtenidos y los calculados por normativas. El objetivo principal fue obtener información precisa sobre la resistencia y rigidez de estas uniones, contribuyendo al avance de la mecánica estructural específica para vigas laminadas clavadas.

En una segunda fase de la investigación se realizaron ensayos y análisis de vigas laminadas clavadas, destacando la mayor rigidez en vigas continuas frente a aquellas empalmadas, así como la variación de resultados entre laminación vertical y horizontal. Esta evaluación enriquece la comprensión del comportamiento de las vigas laminadas clavadas, promoviendo su integración en la construcción de viviendas.