



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



**INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA AL CORTE
EN SISTEMAS MIXTOS DE MADERA Y HORMIGÓN EMPLEANDO
UNIONES MECANICAS**

POR

PABLO FRANCISCO OCHOA ARROYO

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al grado de Magister en Ciencias de la ingeniería con Mención en ingeniería Civil

Profesor Guía
Dr. Víctor Aguilar

Profesor Comisión
Dr. Sebastián Calderón
Dra. Cecilia Bustos
Dr. Emilio Dufeu

Mayo 2024
Concepción (Chile)
© 2024 Pablo Francisco Ochoa Arroyo

© 2024 Pablo Francisco Ochoa Arroyo

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

Siempre en mi vida mi familia ha sido fundamental en mi crecimiento personal con su cariño, carisma y apoyo incondicional, por lo que le dedico a mi papá, mamá y tres hermanos un agradecimiento enorme por su amor que en todo momento me ayudaron en mi vida estudiantil. A la vez, quiero dedicárselo a mi polola por su apoyo y amor incondicional en todas mis ideas y darme ánimo para seguir adelante. También a mis amigos que siempre estuvieron dando alegrías y compartiendo experiencias en la vida que se forman lindos recuerdos de esta etapa.

“Last but not least, I wanna thank me
I wanna thank me for believing in me
I wanna thank me for doing all this hard work
I wanna thank me for, for never quitting...”

ABSTRACT

The creation of a solid connection between wood and concrete, ensuring a monolithic union, is crucial in structural design, which is why an economical and highly rigid connection between both materials must be designed. In this study, different connectors are used for the formation of hybrid unions, focusing on the use of nails and screws to evaluate the influence of the type of connector. In addition, the effect of the inclination of the connector and the order of the materials on the resistance of the connection is analyzed. Shear resistance tests were carried out in the laboratory of the University of Concepción using twenty-four specimens that include eight different configurations with three repetitions per configuration. In the test pieces, the type of connector (nail and screw), order of materials and the angle of inclination of 45° and 90° are varied. The results obtained revealed considerable differences in terms of the shear resistance of the connections, the displacement of connectors and different failure modes present after the shear resistance test carried out.

Keywords: mechanical connectors, composite systems, shear resistance.

RESUMEN

La creación de una conexión sólida entre madera y hormigón, asegurando una unión monolítica resulta crucial en el diseño estructural, por lo cual se debe diseñar una conexión económica y altamente rígida entre ambos materiales. En este estudio, se utilizan distintos conectores para la formación de uniones híbridas, centrándose en el uso de clavos y tornillos para evaluar la influencia del tipo de conector. Además, se analiza el efecto de la inclinación del conector y del orden los materiales en la resistencia de la conexión. Se llevaron a cabo ensayos de resistencia al corte en el laboratorio de la Universidad de Concepción utilizando veinticuatro probetas que incluyen ocho configuraciones distintas con tres repeticiones por configuración. En las probetas se varía el tipo de conector (clavo y tornillo), orden de materiales y el ángulo de inclinación de 45° y 90°. Los resultados obtenidos revelaron considerables diferencias en términos de la resistencia al corte de las conexiones, del desplazamiento de conectores y distintos modos de falla presentes después del test de resistencia al corte realizado.

Palabras clave: conectores mecánicos, sistemas compuestos, resistencia al corte

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Objetivo general y específicos	3
1.4 Metodología	4
1.5 Principales Resultados.....	4
1.6 Organización de la tesis.....	5
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Introducción	7
2.2 Sistemas de conexión	7
2.3 Ventajas de las uniones madera-hormigón.....	19
2.4 Normativas	23
2.4.1 Euro código 5 y pautas de diseño	23
2.4.2 Chile	24
2.5 Conclusión.....	25
CAPÍTULO 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	23
3.1 Introducción	23
3.2 Metodología de trabajo.....	23
3.3 Materiales	27
3.3.1 Conectores: Clavos y Tornillos	27
3.3.2 Mezcla de hormigón	28
3.3.3 Madera.....	29
3.4 Equipamiento	30
3.5 Muestras	32
3.6 Variables	34
3.7 Conclusión.....	35
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y COMENTARIOS	36
4.1 Introducción	36
4.2 Carga máxima por probeta	36
4.3 Corte máximo en las probetas	39
4.4 Módulos de deslizamientos	41
4.5 Desplazamientos.....	43

4.6	Modos de falla.....	47
4.7	Conclusión.....	51
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS		51
5.1	Conclusiones´	51
5.2	Futuras líneas de investigación	52
CAPÍTULO 6 REFERENCIAS		53
CAPÍTULO 7 ANEXOS.....		57
7.1	ANEXO 1: Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	57
7.2	ANEXO 2: Imagen de las tres probetas de la configuración C-45 de HMH.....	58
7.3	ANEXO 3: Imagen de las tres probetas de la configuración T-45 de HMH.....	58
7.4	ANEXO 4: Imagen de las tres probetas de la configuración C-90 de HMH.....	58
7.5	ANEXO 5: Imagen de las tres probetas de la configuración T-90 de HMH.....	59
7.6	ANEXO 6: Imagen de las tres probetas de la configuración C-45 de MHM.....	59
7.7	ANEXO 7: Imagen de las tres probetas de la configuración T-45 de MHM.	59
7.8	ANEXO 8: Imagen de las tres probetas de la configuración C-90 de MHM.....	60
7.9	ANEXO 9: Imagen de las tres probetas de la configuración T-90 de MHM.	60
7.10	ANEXO 10: Gráfico de la carga máxima por probeta testeada	61
7.11	ANEXO 11: Gráfico de la resistencia de corte (N/mm ²) de las 24 probetas	61
7.12	ANEXO 12: Tabla de módulos de deslizamiento de los conectores de las 24 probetas ...	62
7.13	ANEXO 13: Tabla de cargas máximas, corte y desplazamiento de las 24 probetas	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Rangos de módulo de deslizamiento (N/mm) y capacidad última de deformación (mm) para conexiones entre madera y hormigón.	12
Tabla 2.2 Propiedades de la serie de pruebas	15
Tabla 2.3 Resumen de Fuerza máxima y deslizamiento de conectores estudiados.....	18
Tabla 3.1 Propiedades físicas Pino radiata	29
Tabla 3.2 Descripción estadística de las propiedades mecánicas de Pino radiata	30
Tabla 3.3 Medidas de la pieza original de madera.	30
Tabla 3.4 Descripción de las configuraciones de las muestras.....	33
Tabla 4.1 Desviación estándar variando clavos y tornillos	37
Tabla 4.2 Módulos de deslizamiento	42
Tabla 4.3 Carga máxima promedio por una unidad de desplazamiento por configuración	46
Tabla 4.4 Comparación de resistencia del conector al desplazamiento según su ángulo de inclinación	46
Tabla 4.5 Comparación de resistencia del conector al desplazamiento según su tipo de conector	46
Tabla 4.6 Comparación de resistencia del conector al desplazamiento según su orden de materiales de confección	46
Tabla 4.7 Resumen modo de fallas.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Ejemplos de conectores: discretos (a, b, c) y continuos (d, e, f) (Moshiri et al., 2011).....	8
Figura 2.2 Sistemas de conexión (izquierda – sección longitudinal, derecha – sección transversal): (a) clavos; (b) tornillos; (c) tornillos con argolla; (d) espigas; (e) conector tipo x; (f) barras de refuerzo inclinada (Rodríguez et al., 2013b).	9
Figura 2.3 Ejemplos de sistemas de conexión pegados (Shan et al., 2017; Siddika et al., 2021).....	9
Figura 2.4 Ejemplos de sistemas de conexión de muescas (Deam et al., 2008).	10
Figura 2.5 Tornillo inclinado embebido en madera-hormigón. (Symons et al., 2010).....	10
Figura 2.6 Esquemas de Losas Híbridas	13
Figura 2.7 Distribución de esfuerzos de la estructura híbrida. (Siddika et al., 2021)	14
Figura 2.8 Separación en las esquinas entre la viga de madera y losa de hormigón. (Van der Linden, 1999)	14
Figura 2.9 Falla: Corte de conector (Shulman & Loss, 2021).....	14
Figura 2.10 Falla: Agrietamiento en el hormigón (Shi et al., 2020)	15
Figura 2.11 Falla: Deslizamiento relativo del conector con aplastamiento en madera (Dias et al., 2018).....	15
Figura 2.12 Gráfico de curvas de deslizamiento de carga media obtenidas en los ensayos (Dias et al., 2007)	16
Figura 2.13 Conector de corte de 16 mm, plataforma Holorib y fijaciones temporales de 4,5 mm: (a) tornillo vertical de 16 mm; (b) tornillo de 16 mm a 20° de la vertical; (c) tornillo de 16 mm a 40° de la vertical; (d) tornillo de 16 mm a 50° de la vertical (Symons et al., 2010).....	17
Figura 2.14 Gráfico de respuesta de carga/deslizamiento para tirafondos de 16 x 230 mm (no se muestran ciclos de recarga) (Symons et al., 2010)	17
Figura 2.15 Emisiones de CO_2 con diferentes materiales (Iqbal, 2021).	20
Figura 2.16 Gráfico de peso propio del forjado “g” en función de la luz “l” para una carga de servicio “q” de 2,5 kN/m ² : (a) sección totalmente de madera; (b) sección mixta de hormigón y madera; (c) sección totalmente de hormigón (Ceccotti, 2002).	21
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de trabajo	23

Figura 3.2 Probetas: (a) HMH en -45° y 90° ; (b) MHM en 90° y 45°	24
Figura 3.3 Espécimen instalado en máquina de prueba de corte.....	26
Figura 3.4 Clavo corriente 4" (Sodimac Chile, 2023a).....	27
Figura 3.5 Tornillo Turbo Screw 4" (Sodimac Chile, 2023b).....	28
Figura 3.6 Hormigón H-30.....	28
Figura 3.7 Herramientas y elementos de seguridad (Falabella, 2023a, 2023b, 2023c; Sodimac, 2023b, 2023a).	31
Figura 3.8 Maquinaria y herramientas para elaboración de hormigón.....	31
Figura 3.9 Espécimen de Madera-Hormigón-Madera (MHM).....	32
Figura 3.10 Espécimen de Hormigón-Madera-Hormigón (HMH)	32
Figura 3.11 Ejemplo de ángulos de conexión de los especímenes para MHM y HMH: (a) Conector en 90° ; (b) Conector en 45° (MHM) y -45° (HMH)	33
Figura 3.12 Configuraciones de las muestras:.....	34
Figura 4.1 Gráfico de la carga máxima promedio por configuración testeada	36
Figura 4.2 Probetas con configuraciones de: (a) conectores inclinados; (b) conectores rectos.....	38
Figura 4.3 Diagrama de cuerpos libres.....	39
Figura 4.4 Gráfico de la resistencia de corte promedio (N/mm ²) por configuración.	40
Figura 4.5 Gráficos de curvas de carga-desplazamiento	42
Figura 4.6 Gráfico de la carga máxima (kN) y desplazamiento (mm) en configuración HMH.....	44
Figura 4.7 Gráfico de la carga máxima (kN) y desplazamiento (mm) en configuración MHM.	44
Figura 4.8 Carga máxima (kN) y desplazamiento (mm) promedios en las distintas configuraciones.....	45
Figura 4.9 Modo de falla de Corte completo del conector.	48
Figura 4.10 Probetas T1-90 (HMH y MHM) con Corte completo de sus conectores.....	48
Figura 4.11 Modo de falla de deslizamiento del conector.	49
Figura 4.12 Probetas T3-45 y T2-45 (MHM) con Deslizamiento de sus conectores.....	49

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El uso de la madera como material estructural junto al hormigón tiene numerosas ventajas. La madera está presente en todo el mundo y con una gestión sostenible adecuada tiene una disponibilidad potencial ilimitada. Dentro de sus ventajas se incluye que la madera tiene una baja relación de peso/resistencia por lo que es conveniente para el transporte, montaje y producción de está. Este material de construcción llama la atención al cumplir requisitos ambientales y ecológicos de la opinión pública como también de los gobiernos. Además, en comparación con otros materiales estructurales, presenta ventajas de flexibilidad arquitectónica y de diseño, construcción más rápida en terreno, construcciones con bajo peso e inclusive reduciendo costos de las estructuras (Hairstans, 2007).

Desde el año 2021 el área de la construcción vuelve a sus niveles de gasto energético que se encontraba previo a la pandemia agregando otras nuevas obras, por lo cual la demanda energética de los edificios aumentó. La creciente economía y crisis climáticas desafían y resaltan el progreso necesario para descarbonizar y mejorar la resiliencia del sector global de la construcción (United Nations Environment Programme, 2022).

Las estructuras híbridas de madera-hormigón han tomado posición en el área de la construcción para reducir la contaminación que se genera en el rubro, al reducir un porcentaje del hormigón utilizado en las edificaciones. Quedando un porcentaje de hormigón que actúa como soporte de carga y proporciona resistencia a la compresión, para poder realizar edificaciones de gran altura junto a la madera. La unión híbrida madera-hormigón es una técnica de construcción en la que una viga, columna o losa de madera se conecta a un elemento de hormigón el cual cubre a la madera de la intemperie y le da rigidez al elemento compuesto utilizando diferentes tipos de conectores de corte en la unión híbrida. Este método se aplica en rehabilitaciones de edificios históricos como también a construcciones de puentes y nuevas edificaciones habitacionales (Yeoh et al., 2011).

En las estructuras de madera-hormigón, las uniones son los componentes críticos ya que gobiernan la rigidez, resistencia, capacidad de servicio y durabilidad. La implementación de estructuras grandes y rígidas que utilicen madera como material base, donde se encuentran grandes secciones de madera maciza, han hecho necesaria la necesidad de mejorar los mecanismos y técnicas de fijación, a fin de lograr una transferencia eficaz de cargas entre estructuras compuestas de madera-hormigón. La elección de una conexión de corte estructuralmente efectiva pero económica entre el hormigón y la madera es importante para que el elemento compuesto sea una solución viable que se pueda incluir en la construcción industrial y competir con las estructuras de hormigón armado (Berardinucci et al., 2017a).

Hay grupos de conectores para las uniones entre la madera con el hormigón entre los cuales se encuentran las micromuecas en la madera para el ingreso de hormigón dentro de las muecas, adhesivos que suelen ser resinas epoxi o poliuretano y uniones mecánicas como son los clavos y tornillos, entre otros. Cada grupo de conexión tiene distintas rigideces y valores de mercado (Sikora & Liu, 2018). En esta investigación se escogen clavos y tornillos por su economía y disponibilidad. La resistencia de las conexiones mecánicas de las uniones híbridas se puede mejorar a través del módulo de deslizamiento del conector y este a la vez se puede mejorar según el ángulo de incrustación del tornillo o clavo, siendo un ángulo óptimo entre 45° a 50° (Berardinucci et al., 2017a).

La construcción de elementos con uniones híbridas entre madera y el hormigón tiene los siguientes beneficios: optimización de construcción al tener facilidades de montaje en la madera, mejora de la separación acústica entre habitaciones, mejora en el aumento de la masa térmica lo que influye en una reducción del consumo de energía (Yeoh et al., 2011) y mejora de la transferencia de carga a la cimentación al reducir la utilización de hormigón en la estructura (Sikora & Liu, 2018). Existen barreras que impiden la utilización de la implementación de esta técnica por no tener un código de construcción o pauta de diseño que avale la construcción de edificios híbridos. Esto se debe a la cultura de la industria en la cual se debe hacer una transferencia de tecnología, análisis de la durabilidad de los materiales y costos relacionados (Gosselin et al., 2017).

1.2 Hipótesis

Si se utilizan clavos o tornillos para transferir la carga de corte en uniones de madera-hormigón, los conectores dispuestos en ángulo de 90° experimentaran mayor desplazamiento en su carga máxima en comparación a los conectores en ángulo de 45° .

1.3 Objetivo general y específicos

Después de identificar la necesidad de transferir la carga de corte en las uniones de madera-hormigón, se investiga la influencia del ángulo de conexión de dos conectores mecánicos (clavo y tornillo de 4") para ver si mejora la resistencia de corte. En la construcción de uniones madera-hormigón, se utilizan diversos conectores. Los conectores mecánicos empleados en esta investigación representan el tipo comúnmente utilizado en la construcción nacional. Por lo tanto, se elaboró un programa experimental con el objetivo de entender su comportamiento bajo cargas de corte para utilizar las ventajas y propiedades mecánicas de los conectores, para su utilización en varios sistemas de conexión en interfaces de madera-hormigón.

Objetivo general:

- Evaluar el comportamiento de la transferencia de carga de clavos y tornillos en uniones entre madera-hormigón a distintos ángulos y determinar su resistencia al corte y modalidades de fallas.

Objetivos específicos:

1. Evaluar experimentalmente la resistencia al corte de clavos y tornillos en la interfaz de unión entre madera y hormigón.
2. Analizar la influencia en la resistencia al corte del tipo y ángulo de inclinación de los conectores y de la alternación del orden de los materiales en las uniones madera-hormigón.

3. Identificar los modos de falla que se presentan en los materiales de las uniones de madera-hormigón.

1.4 Metodología

Inicialmente se analiza información de la literatura para determinar los requisitos del diseño de las uniones para la aplicación del test de resistencia al corte, lo que incluye los factores de carga, el tamaño y la forma de los elementos de madera y hormigón que se unen. Luego se selecciona el tipo de conector, específicamente tornillo y clavos, los cuales se analizan por su costo y facilidad de instalación. Después se fabrican las probetas, donde se insertan los conectores mecánicos en la madera en su posición respectiva con los ángulos de inclinación seleccionados para cada una de las ocho configuraciones, donde posteriormente se les vertió el hormigón fresco confeccionado en el instante. Las probetas ya con hormigón se someten a un proceso de curado durante 28 días para alcanzar el estándar de resistencia.

Finalmente, se realiza el test de resistencia al corte aplicando una carga en una dirección en los conectores a través de los materiales, simulando la fuerza de corte que experimentará el conector ante distintos tipos de fuerzas externas. Mediante la lectura proporcionada por los sensores incorporados en la máquina de prueba de corte “Instron 8801”, se analizan las cargas aplicadas y los desplazamientos obtenidos para cada probeta.

1.5 Principales Resultados

Este estudio evidenció que los conectores mecánicos pueden ofrecer altos niveles de resistencia al corte y rigidez. Dentro de las configuraciones analizadas se destaca la configuración de Hormigón-Madera-Hormigón (HMH), muestra una notable superioridad en resistencia en comparación a las configuraciones de Madera-Hormigón-Madera (MHM). Entre estas configuraciones, el clavo colocado a 90° presentó la menor resistencia, soportando 1.46 kN (MHM) y 1.77 kN (HMH) en un milímetro de desplazamiento,

mientras que el tornillo dispuesto a 45° en HMH exhibió la mayor resistencia, alcanzando 14.84 kN en un milímetro de desplazamiento.

Se observó que los conectores inclinados presentan mayor resistencia al corte y capacidad de resistencia al desplazamiento, debido a que poseen un mayor módulo de deslizamiento. El tipo del conector a utilizar dependerá de los requisitos específicos de la estructura, sin embargo, el recomendado es el tornillo. En las técnicas de diseño del ángulo de inserción del conector se recomienda la inserción en 45°, se puede mejorar insertando 2 conectores inclinados tipo “X” para mejorar la reversibilidad ante sismos.

La hipótesis se confirmó: los conectores en 90° experimentan mayor desplazamiento en su carga máxima en comparación a los conectores en 45°. Sin embargo, se requiere más investigación en el ámbito nacional para optimizar el diseño y rendimiento de estos conectores, considerando la posibilidad de combinar diferentes técnicas de fijación para mantener unidos la madera y el hormigón como un solo elemento.

1.6 Organización de la tesis

La tesis está dividida en cinco capítulos. El capítulo 1 es la introducción al tema, el capítulo 2 revisa el estado del arte existente en la literatura de conectores híbridos, sus ventajas y normas, el capítulo 3 contiene el programa experimental que se realiza, el capítulo 4 presenta los resultados y finalmente el capítulo 5 entrega las conclusiones del trabajo. A continuación, se entrega una breve descripción de los capítulos.

Capítulo 2 – Estado del arte

La revisión de la literatura describe los sistemas de conexión híbridos, los diferentes tipos de conectores que se encuentran en las aplicaciones, la influencia de la inclinación de inserción de los conectores, las ventajas de las uniones híbridas en las edificaciones, ejemplos de experimentos realizados, tipos de elementos y las normativas internacionales relacionadas.

Capítulo 3 – Programa experimental

La programación experimental describe la metodología de trabajo utilizada desde la selección de técnicas y materiales hasta los ensayos realizados. Se incluye la descripción de los materiales, equipamiento y procedimientos utilizados para la confección de las distintas configuraciones de las probetas. Además, se definen las variables de interés de esta investigación que influyen en la resistencia de corte de las probetas.

Capítulo 4 – Resultados y Comentarios de los ensayos

Se presentan los resultados obtenidos que incluyen la carga máxima, corte máximo, módulos de deslizamiento, los desplazamientos y modos de falla por cada probeta. Estos están representados en gráficos que contienen los resultados promedios de cada configuración de probeta. Además, se presentan tablas con información de deslizamiento por configuración y la descripción de modos de falla de cada probeta.

Capítulo 5 – Conclusiones y futuras líneas de investigación

En este capítulo se presentan las conclusiones de la investigación y del trabajo experimental realizados en los capítulos 3 y 4. Finalmente, se incluyen las propuestas de futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En el siguiente capítulo se presenta el estado del arte de los sistemas de conexión entre 2 materiales en especial entre la madera y el hormigón, las cuales son una tecnología innovadora que se ha desarrollado para cerrar la brecha entre diferentes materiales estructurales. Se describe la utilización y el desempeño de sistemas de conexión entre madera y hormigón, además de los distintos tipos de conexiones existentes. Asimismo, se presenta la influencia y propiedades de la inclinación del conector en la conexión, se explican un par de ejemplos de ensayos de distintas conexiones, las ventajas de las uniones madera-hormigón en la estructura y normativas presentes en la literatura.

2.2 Sistemas de conexión

Los sistemas de conexión se diseñan para unir una capa inferior de madera y otra superior de hormigón, las cuales están unidas entre sí a través de conectores de corte (Shan et al., 2017). El sistema de conexión transmite la fuerza de corte entre el elemento de hormigón y de madera, y debe ser lo más rígido posible para reducir el deslizamiento relativo entre la fibra inferior del hormigón y la fibra superior de la madera de modo que la unión se comporte totalmente rígida (Abdul & Mirdad, 2020).

Al construir sistemas compuestos de madera-hormigón, el desafío comienza en el diseño del sistema de conexión. Para caracterizar el comportamiento mecánico, es necesario considerar su rigidez, resistencia y ductilidad (Rodrigues et al., 2013a). La rigidez indica la capacidad de resistir el deslizamiento en la interfaz madera-hormigón, la resistencia es la carga máxima que se presenta en el conector y a través del modo de falla se puede apreciar que tan dúctil se comporta el conector (Moshiri et al., 2011). Hay que tener en cuenta que la relación del módulo de elasticidad entre el hormigón y la madera generalmente es superior a dos, de modo que se tiene distintas deformaciones en cada material (Dias et al., 2018), por este motivo es de suma relevancia que los conectores sean totalmente resistentes para

transmitir las fuerzas de corte en la interfaz, suficientemente rígidos para transmitir la carga con un desplazamiento limitado en la interfaz y suficientemente dúctiles para permitir la distribución completa de la carga y evitar fallas en los conectores (Schänzlin et al., 2018).

El desempeño de los elementos de los sistemas compuestos depende fuertemente de la elección del sistema de conexión. Existen sistemas de conexiones discretos que consideran una fabricación con una cantidad de sujetadores mecánicos que no se extienden a lo largo de la longitud completa de la pieza a unir y también existen sistemas de conexiones continuos que se instalan en las uniones a lo largo del elemento constituido por madera-hormigón (Deam et al., 2008). A pesar de que los conectores continuos pueden ofrecer potencialmente mayor rigidez y resistencia, los conectores discretos, como una línea de tornillos o clavos, son más prácticos en el momento de la instalación debido a su adaptabilidad a distintos diseños de conexión, así como a su instalación más simple y rápida. (Symons et al., 2010). En la figura 2.1 se puede observar ejemplos de ambos tipos de conectores.

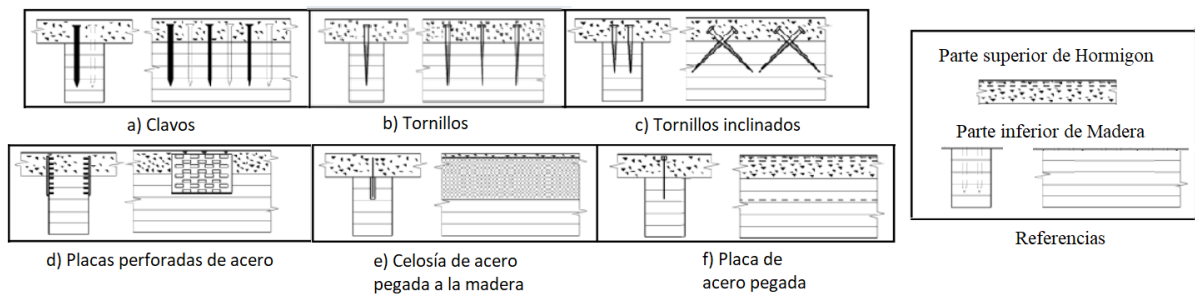


Figura 2.1 Ejemplos de conectores: discretos (a, b, c) y continuos (d, e, f) (Moshiri et al., 2011).

Los conectores se pueden separar en tres grupos. El primer grupo corresponde a los conectores mecánicos, los cuales presentan una distribución discreta por la posición distanciada de sus conectores en los cuales se hayan clavos, tornillos, espigas, barras de refuerzos, entre otros que se insertan dentro de la madera para posteriormente hormigonar y de este modo queda la estructura madera-hormigón como se aprecia en la figura 2.2. El segundo grupo corresponde a conectores pegados, los cuales debido a la aplicación del adhesivo en todo el área de contacto entre materiales presenta una distribución continua

como se muestra en la figura 2.3, donde el esfuerzo de corte en la interfaz madera-hormigón se distribuye uniformemente, evitando las concentraciones de esfuerzos locales. Este grupo fácilmente se puede combinar con otros grupos para lograr una mejor unión de los materiales. Por otro lado, las conexiones encoladas introducen la posibilidad de rotura por fragilidad de los materiales, además la utilización de resinas epoxi aumenta el costo y la dificultad de construcción al necesitar a un experto en la aplicación del adhesivo (Rodríguez et al., 2013a). El tercer grupo corresponde a conectores con muescas en la madera, los cuales son conexiones que a la madera se le extrae un trozo que puede ser rectangular o circular como se muestra en la figura 2.4. Este tipo de conector se puede mezclar con conectores mecánicos y pegados para mejorar su resistencia y capacidad de transferir cargas entre la madera y hormigón (Deam et al., 2008).

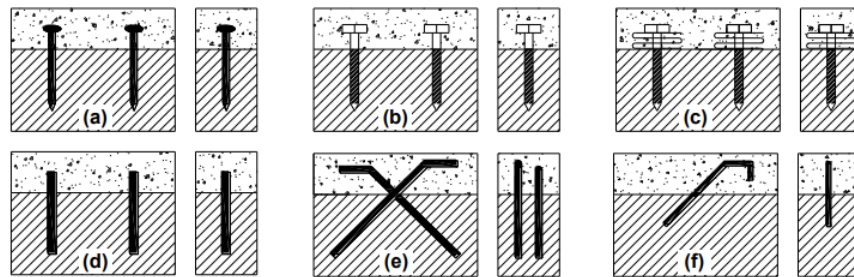


Figura 2.2 Sistemas de conexión (izquierda – sección longitudinal, derecha – sección transversal): (a) clavos; (b) tornillos; (c) tornillos con argolla; (d) espigas; (e) conector tipo x; (f) barras de refuerzo inclinada (Rodríguez et al., 2013b).



a) Placa perforada pegada con adhesivo epoxi a la madera



b) Conector de malla de acero con adhesivo

Figura 2.3 Ejemplos de sistemas de conexión pegados (Shan et al., 2017; Siddika et al., 2021).



Figura 2.4 Ejemplos de sistemas de conexión de muescas (Deam et al., 2008).

Por otro lado, en un estudio demostraron que los conectores mecánicos inclinados en la dirección del deslizamiento proporcionan una mayor rigidez (módulo de deslizamiento) que los conectores mecánicos en posición vertical, porque el deslizamiento relativo entre la madera y el hormigón se resiste principalmente al doblar el conector y esto dirige a una rigidez de deslizamiento menor en la posición vertical. Sin embargo, si los conectores están inclinados en la dirección de la carga de corte (R) como se muestra en la figura 2.5 entonces el conector se carga tanto axialmente como en flexión, lo que conlleva a obtener un mayor módulo de deslizamiento por tornillo o clavo mejorando la rigidez a la flexión efectiva de una viga de madera-hormigón. (Symons et al., 2010).

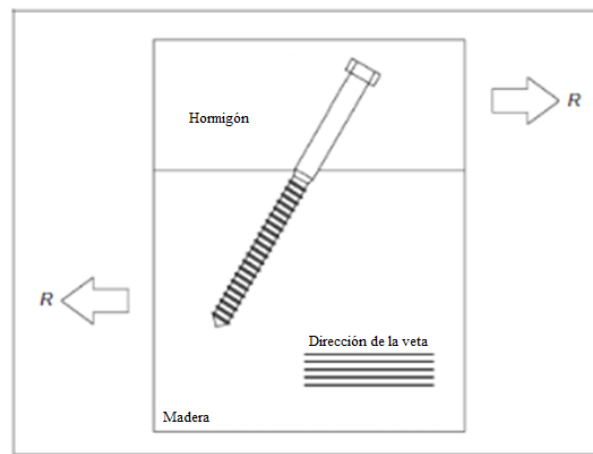


Figura 2.5 Tornillo inclinado embebido en madera-hormigón. (Symons et al., 2010)

Dentro de la escasa información y códigos de diseño sobre la rigidez de los conectores inclinados de corte, se encuentra el Euro código 5 que es para diseño de estructuras de madera en edificios la cual ofrece una ecuación empírica para el módulo de deslizamiento de tornillos (ecuación 1) y clavos sin preperforación (ecuación 2). (CEN, 2004).

$$K = \frac{2}{23} \rho_m^{1,5} d \quad (1)$$

$$K = \frac{2}{30} \rho_m^{1,5} d^{0,8} \quad (2)$$

Donde: K = Módulo del deslizamiento ; d = Diámetro del vástago del tornillo ; ρ = Densidad de la madera

Además, si las densidades medias de los dos elementos de la conexión son diferentes, entonces ρ_m en las expresiones anteriores debe tomarse según la ecuación 3.

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{madera} * \rho_{Hormigón}} \quad (3)$$

Sin embargo, la ecuación es solo para conectores verticales y no tiene en cuenta el largo del conector (Symons et al., 2010). Incluso Ceccotti et al. (2002) recomiendan la medición experimental de los valores del módulo de deslizamiento debido a la variedad de conectores utilizados, los cuales provienen de distintas fuentes de materiales y procesos industriales. Para obtener el módulo de deslizamiento se deben obtener los datos de carga y desplazamiento de cada probeta, para luego graficar y de la parte lineal de la curva carga-desplazamiento determinar el módulo de deslizamiento con la ecuación 4 (-Schanack & -Ramos, 2010).

$$K = \frac{\Delta F_u}{\Delta \delta} = \frac{0.5 * F_u - 0.1 * F_u}{\delta(50\% F_u) - \delta(10\% F_u)} \quad (4)$$

Donde: K = Módulo del deslizamiento ; F_u = Fuerza última ; δ = Desplazamiento de conexión

En la práctica es sumamente importante la unión entre la madera y el hormigón en los sistemas compuestos, ya que la rigidez mecánica está en función del espaciamiento de la conexión y el módulo de deslizamiento, el cual se refiere a la capacidad del conector para deslizarse a lo largo del eje de unión entre dos componentes siendo una medida de

resistencia a la fricción entre el conector y las superficies, que influye directamente en el desplazamiento máximo del sistema que queda limitado por la capacidad de deformación última de la conexión (Dias & Jorge, 2011).

Entonces se tiene que el módulo de deslizamiento y la capacidad de deformación última de la conexión son propiedades claves, ya que los sistemas de conexión con módulo de deslizamiento altos suelen ser las conexiones con capacidades últimas de deformación más bajas en el sistema compuesto. Por esta razón, estas dos propiedades se deben tener en consideración al momento de hacer un análisis de la capacidad de deformación del sistema híbrido (Dias & Jorge, 2011).

En la tabla 2.1, se presentan valores esperados de los módulos de deslizamiento (K_{mdc}) y capacidad de deformación última (δ_{ult}) de las conexiones más utilizadas en sistemas híbridos:

Tabla 2.1 Rangos de módulo de deslizamiento (N/mm) y capacidad última de deformación (mm) para conexiones entre madera y hormigón.

Conexión	K_{mdc} (N/mm)	δ_{ult} (mm)
Clavos rectos	2041	15
Tornillos rectos	1825	15
Clavijas rectos	7600	15
Placas de clavos rectos	48800	10
Tornillos inclinados en 45°	29200	5
Malla de acero	415460	4
Muesca circular con clavija	79500	15
Muesca rectangular	132500	0.5
Barras de refuerzo encoladas inclinadas	103000	2

(Dias & Jorge, 2011).m

En general, el comportamiento de las conexiones híbridas depende de una serie de factores, como el tipo de conectores utilizados ya presentados anteriormente, la geometría de la conexión y las cargas aplicadas. Desafortunadamente, las estructuras de madera están

limitadas por la capacidad de flexibilidad de la madera que, en comparación al hormigón, se deforma más bajo cargas equivalentes. Por esta razón, el objetivo es combinar estos dos materiales para hacer una estructura más rígida y limitar la deformabilidad a través de una conexión que lo permita. (Augeard et al., 2020)

Dentro de estas estructuras o elementos, se encuentran principalmente vigas de madera que unen a losas de hormigón logrando una losa híbrida de madera-hormigón en un diafragma (figura 2.6). En estos elementos, la madera se utiliza principalmente para soportar las cargas de flexión presentes en un piso, mientras que el hormigón aporta rigidez y resistencia a la compresión. (Yeoh et al., 2011)

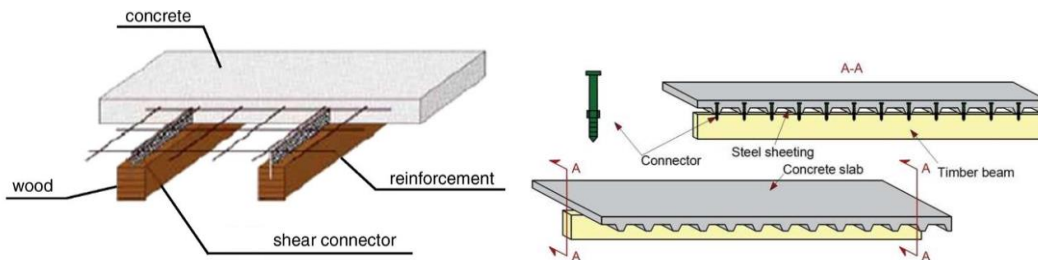


Figura 2.6 Esquemas de Losas Híbridas

En estas estructuras híbridas, es crucial controlar las deflexiones, aplastamientos en madera y el deslizamiento relativo entre las capas de madera y hormigón, lo que implica analizar la conexión del sistema de conectores en el elemento híbrido. El diseño compuesto de madera y hormigón se centra en la distribución de deformaciones, buscando que la madera trabaje a tracción y el hormigón a compresión en la interfaz del elemento híbrido, como se observa en la Figura 2.7. No obstante, la relación entre las deformaciones de esfuerzos y la deflexión no está estandarizada, ya que varía entre los diferentes conectores utilizados en el corte (Siddika et al., 2021).

Estas deformaciones traen fuerzas axiales y de corte en el sistema de conexión, las cuales pueden generar fallas como levantamiento en las esquinas de la interfaz de los materiales como se muestra en la figura 2.8, corte del conector con aplastamiento en la madera (figura 2.9), agrietamiento en el hormigón (figura 2.10), deslizamiento relativo del conector con aplastamiento en la madera (figura 2.11), entre otras fallas dependiendo del tipo de conector.

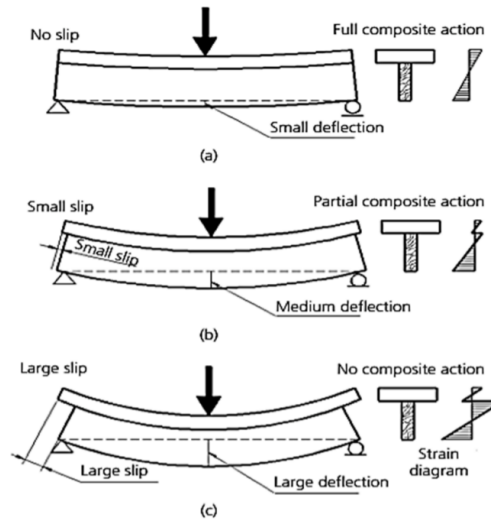


Figura 2.7 Distribución de esfuerzos de la estructura híbrida. (Siddika et al., 2021)

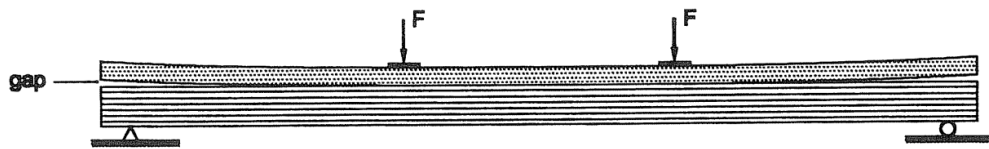


Figura 2.8 Separación en las esquinas entre la viga de madera y losa de hormigón. (Van der Linden, 1999)



Figura 2.9 Falla: Corte de conector (Shulman & Loss, 2021)



Figura 2.10 Falla: Agrietamiento en el hormigón (Shi et al., 2020)**Figura 2.11** Falla: Deslizamiento relativo del conector con aplastamiento en madera (Dias et al., 2018)

En el estudio de Dias et al., 2007, se analiza la capacidad portante de uniones de hormigón-madera realizadas con fijaciones tipo espiga, donde se realizan ocho distintas configuraciones, cuyas propiedades se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Propiedades de la serie de pruebas

Muestra	Especie de Madera	Hormigón ¹	Acero (Fy(N/mm ²))	Conector
8 mm	Abeto	C25/30	456	Barra lisa
10 mm A	Abeto	C25/30	496	Barra lisa
HSC	Abeto	C50/60	456	Barra lisa
MP	Pino marítimo	C25/30	511	Barra lisa
C	Castaño	C25/30	477	Barra lisa
LWAC	Abeto	LC16/18	462	Barra lisa
10 mm B	Abeto	C30/3	S500 ²	Barra perfilada
INT	Abeto	C30/3	S500 ²	Barra perfilada

¹ Clase de hormigón de acuerdo con en el Euro código 2 (CEN 1997)

² Como valor característico se asumió la resistencia última del acero, obtenida de acuerdo con el Euro código 2 (CEN 1997)

(Dias et al., 2007)

Los ensayos de corte de este estudio mostraron una gran capacidad de deformación plástica como se aprecia en la figura 2.12 y el comportamiento observado corresponde a la fluencia

del pasador de acero en dos puntos, por lo cual se forman rotulas plásticas. Al separar los materiales después de los ensayos, la parte del conector en el hormigón no tenía movimiento axial y alrededor del conector se encontraba daño en el hormigón. En otras palabras, el concreto actúa como una restricción casi perfecta.

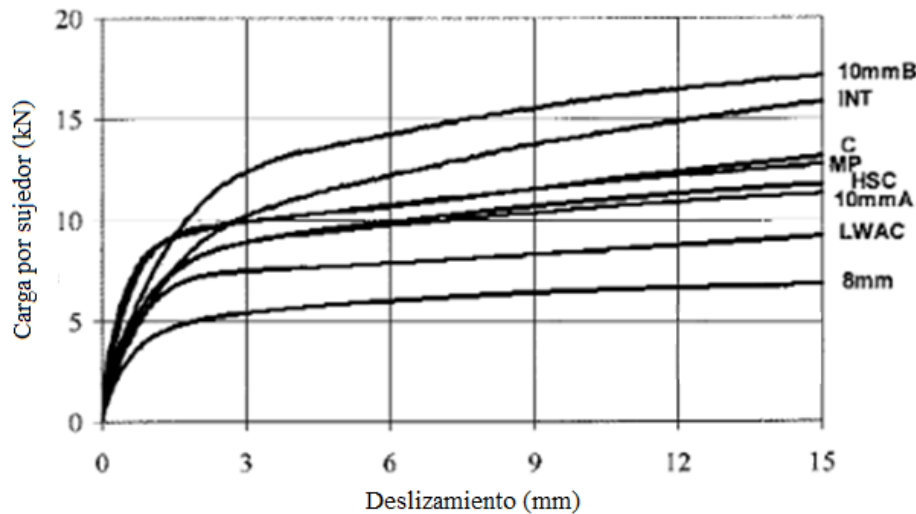


Figura 2.12 Gráfico de curvas de deslizamiento de carga media obtenidas en los ensayos (Dias et al., 2007)

En las pruebas de corte analizadas, el valor de la capacidad de carga disminuyó alrededor de un 8% al utilizar una capa intermedia de tablero de piso de 20 mm. La configuración 10 mm B y 10 mm A son similares, sin embargo, la primera supera en capacidad de carga en un 66% a la segunda, infiriendo que es debido a la calidad del acero y la forma superficial del conector (Dias et al., 2007). Así, se observa que una capa intermedia entre materiales, la calidad del acero y la forma del conector son influyentes en el diseño de una conexión híbrida.

En otro estudio de Symons et al., 2010, se elaboraron uniones con cinco conectores tirafondos por espécimen de 16 mm de diámetro de vástago y 230 mm de largo los cuales se insertaron en ángulos de 0°, 20°, 40° y 50° con respecto a la vertical, como se presenta en la figura 2.13. En estos ensayos se investigó la respuesta de carga-deslizamiento de las conexiones de cortante de un sistema de suelo compuesto de madera laminada encolada de grado GL28 y hormigón que utiliza una cubierta de acero como encofrado permanente para la losa de suelo de hormigón.

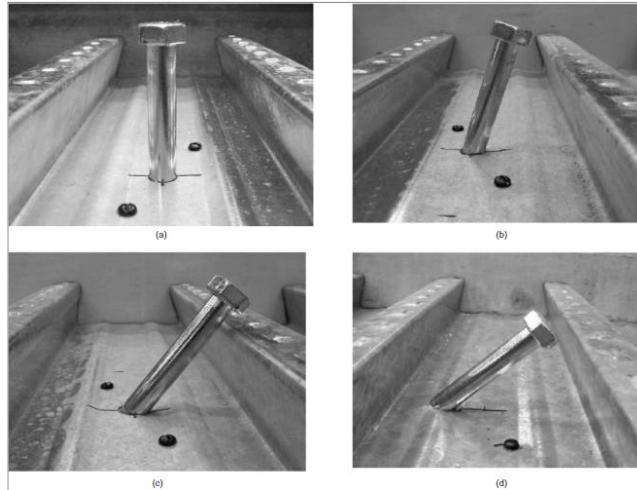


Figura 2.13 Conector de corte de 16 mm, plataforma Holorib y fijaciones temporales de 4,5 mm: (a) tornillo vertical de 16 mm; (b) tornillo de 16 mm a 20° de la vertical; (c) tornillo de 16 mm a 40° de la vertical; (d) tornillo de 16 mm a 50° de la vertical (Symons et al., 2010)

En la figura 2.14 se observa la carga por conector frente a la respuesta de deslizamiento de los especímenes configurados con ángulos de 0°, 20° y 40°. En el ensayo se aplicó una carga cíclica, sin embargo, los ciclos se eliminaron de la gráfica para mejor claridad. En el gráfico se aprecia que la muestra con el conector en 20° y 40° soportan más carga que el conector vertical en una misma cantidad de desplazamiento, por lo cual justifica que cuando más cerca este el ángulo de inserción del conector a 45°, este tendrá mayor resistencia al desplazamiento.

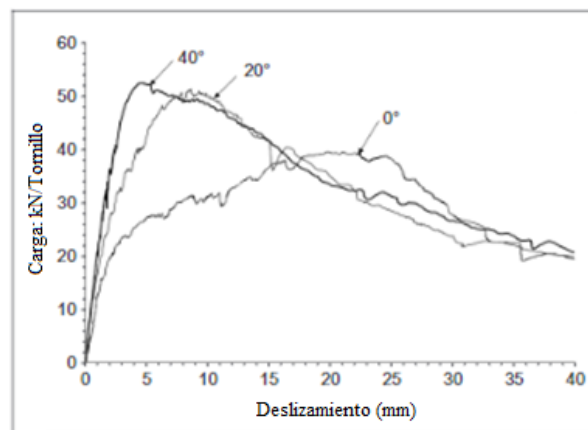


Figura 2.14 Gráfico de respuesta de carga/deslizamiento para tirafondos de 16 x 230 mm (no se muestran ciclos de recarga) (Symons et al., 2010)

La tabla 2.3 recopila distintos estudios de conexiones híbridas entre madera y hormigón, incluyendo información sobre las estructuras utilizadas, sistemas de conexión empleados, tipos de carga aplicada, fuerzas máximas soportadas en kilo newtons (kN) y desplazamientos en milímetros (mm).

Los datos presentados muestran resultados de pruebas de corte las cuales consisten en mantener las piezas de hormigón y madera debidamente unidos y en una pieza se aplica una fuerza gradualmente creciente perpendicular a la superficie de la unión. En las pruebas Push-out se realiza de forma similar aplicando una carga axial a través de un dispositivo de prueba específico, ejerciendo presión desde el interior hacia afuera de la unión. Estos ensayos se realizaron en diversas configuraciones, evidenciando las resistencias y deslizamientos obtenidos en ensayos que evalúan la resistencia de las uniones entre elementos de madera y hormigón en diferentes contextos experimentales.

Tabla 2.3 Resumen de Fuerza máxima y deslizamiento de conectores estudiados

Referencia	Descripción de la Estructura	Sistema de Conexión	Tipo de Carga	Fuerza máxima (kN)	Deslizamiento (mm)
(Deam et al., 2008)	LVL (138 mm) - Hormigón Armado (70 mm)	Muestra redonda con tornillo 90° (L: 150 mm - d: 12mm)	Test de Corte	31.4	1.89
		Muesca rectangular con tornillo 90° (L: 150 mm - d:12 mm)		54.9	1.35
		2 tornillos SFS en 45° (L: 100 mm - d: 7.5 mm)		18.5	2.52
		Pernos en 90° (L: 165 mm - d: 12 mm)		21.5	15
		Pernos en 90° (L: 155 mm - d: 16 mm)		34.2	15
(Mai et al., 2018)	CLT (150 mm)- Hormigón (100 mm)	Tornillos 45° (L:150 mm - d: 9 mm)	Test Push-Out	31.76	4.49
		Tornillos 90° (L:150 mm - d: 9 mm)		48.21	17.62
		Tornillo SFS 45° (L:145 mm - d: 7.5 mm)		37.16	2.3

(Berardinucci et al., 2017a)	Madera (120 mm) - OSB (20 mm) - Hormigón (50 mm)	Tornillos en 45° (L: 160 mm - d: 8 mm)	Test Push-Out	55	2
	Madera (120 mm) - OSB (44 mm) - Hormigón (50 mm)	Tornillos en 45° (L: 240 mm - d: 8 mm)		68	1.79
(Sikora & Liu, 2018)	Madera (40 mm) - Hormigón (150 mm)	Clavo en 90° (L: 50 mm - d: 3.2 mm)	Test Push-Out	14	2.2
		Adhesivo de resina epoxi		43	1.4

Los resultados presentados en la tabla 2.3 revelan que los experimentos que incorporan muescas muestran un desempeño notablemente superior en términos de la relación entre la fuerza máxima aplicada y el desplazamiento resultante. Además, se observa que los ensayos que emplean conectores mecánicos inclinados registran desplazamientos menores, lo que sugiere un módulo de deslizamiento superior en comparación con los conectores dispuestos a 90°. Estos hallazgos indican que, al variar entre diferentes configuraciones de materiales, conectores, ensayos y ángulos de inclinación, los mejores resultados muestran un deslizamiento promedio en la interfaz de unión de alrededor de 2 mm, lo cual refleja una baja tolerancia al desplazamiento en estas uniones de madera-hormigón.

2.3 Ventajas de las uniones madera-hormigón

Las uniones híbridas de madera y hormigón ofrecen una serie de ventajas que convierten su utilización en una opción cada vez más popular en la industria de la construcción. La combinación de estos dos materiales con una buena conexión resistente al corte permite aprovechar las fortalezas de cada uno de ellos al mantener estos elementos juntos, creando un sistema compuesto que es fuerte, duradero, eficiente y sostenible.

Entre las principales ventajas de las uniones híbridas de madera y hormigón se encuentran:

1. **Sostenibilidad:** La madera es un recurso natural la cual tiene un proceso de secuestro de carbono al ir creciendo, por lo que tiene un alto atractivo como material de construcción sostenible. En este proceso los bosques extraídos son reforestados cumpliendo con la reposición de la madera y manteniendo la sostenibilidad ambiental. Por esta razón, la madera es competitiva frente al

hormigón porque a largo plazo contribuye más a la sostenibilidad en la construcción debido a que tiene huella de carbono negativa (Iqbal, 2021).

A continuación, se presenta la figura 2.15 con un gráfico con emisiones de CO_2 diferentes materiales:

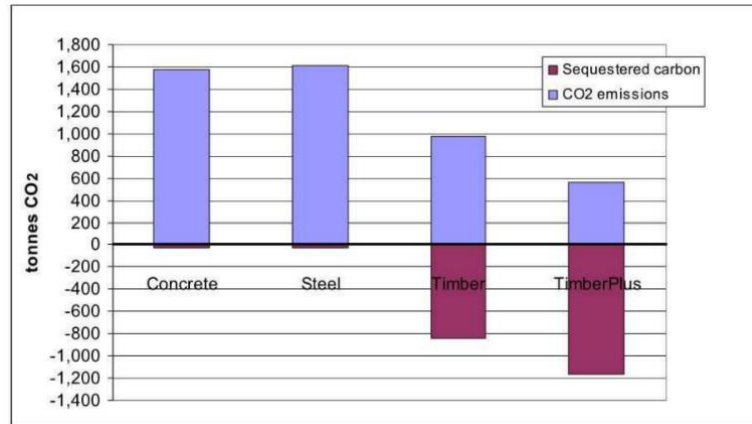


Figura 2.15 Emisiones de CO_2 con diferentes materiales (Iqbal, 2021).

En la figura 2.15 se puede apreciar como la madera en comparación al hormigón genera mucho menos CO_2 , contribuyendo a tener edificaciones con menos impactos ambientales al reducir el calentamiento global como también las emisiones de gases al aire (Iqbal, 2021).

Además, la madera es un excelente aislante térmico y acústico, lo que ayuda a reducir el consumo de energía necesario para la climatización del edificio, esto debido al aumento de la masa térmica. En el análisis de los impactos y los sonidos que se esparcen por el aire, la aislación acústica mejora por la mayor amortiguación del ruido que se tiene en comparación a los sistemas que están compuestos por hormigón (Ceccotti, 2002). Lo que conlleva a favorecer la transferencia de diseño en los edificios de gran altura (superiores a 8 niveles) a edificios de madera-hormigón, obteniendo estos beneficios de la madera junto a la rigidez del hormigón al obtener, por ejemplo, diseños de losas de hormigón junto a vigas de madera o muros de hormigón con conexiones a losas de madera.

2. Durabilidad: La madera seca tiene una durabilidad de vida casi indefinida, lo que significa que, dentro de un edificio híbrido, el hormigón protegería a la madera de la intemperie. Además, se le pueden aplicar métodos de preservación, como el creosotado, que implica bañar la madera o aplicar capas de este líquido para protegerla de la degradación causada por hongos, insectos y las condiciones climáticas (Uslar, 1939). Este método de preservación se ha utilizado en puentes de madera-hormigón en Estados Unidos (Wacker et al., 2020).

El hormigón es un material muy duradero y resistente a compresión. Su unión con la madera, la cual es resistente a esfuerzos de tracción, permite obtener un sistema fuerte y duradero que soporta cargas y fuerzas de diferentes tipos, ya que se aprovecha al máximo la resistencia y rigidez de ambos materiales (Ceccotti, 2002).

Una conexión bien unida permite mantener la forma plana en la interfaz de una sección mixta de hormigón y madera, a través de una gran rigidez de la conexión. Esta sección mixta, logra ser más eficiente en la carga soportada por unidad de peso propio en comparación a los sistemas de hormigón, debido a la densidad menor de la madera con respecto al hormigón (Ceccotti, 2002). A continuación, se presenta la figura 2.16 que presenta la relación entre el peso propio y la luz para distintos tipos de construcciones:

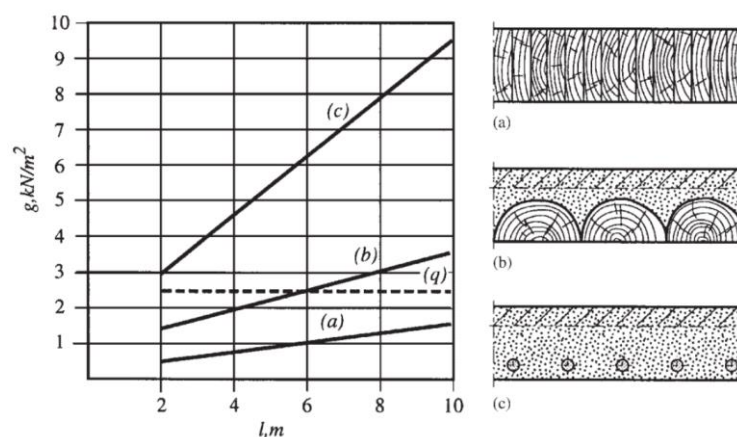


Figura 2.16 Gráfico de peso propio del forjado “g” en función de la luz “l” para una carga de servicio “q” de 2,5 kN/m²: (a) sección totalmente de madera; (b) sección mixta de hormigón y madera; (c) sección totalmente de hormigón (Ceccotti, 2002).

En la figura 2.16, se aprecia que el peso propio de una sección de estructura híbrida en un largo de luz igual al de un sistema de hormigón es considerablemente menor, por lo cual, se baja la carga del peso muerto en el edificio al cambiar una parte de hormigón por madera.

3. Flexibilidad: La unión entre la madera y hormigón permite una mayor flexibilidad en el diseño y la construcción del edificio. La madera es un material más ligero que el hormigón, ya que la densidad de la madera es menor que la del hormigón armado, lo que permite una mayor libertad en la disposición de los espacios interiores y en la forma del edificio. Por lo cual, si se tiene una conexión aceptable entre estos ambos materiales se puede tener hasta el triple de capacidad de carga y hasta seis veces más rigidez a la flexión al tener el hormigón incorporado junto a la madera en comparación a los sistemas totalmente de madera (Ceccotti, 2002).
4. Estética: Las uniones híbridas de hormigón y madera contraen un aspecto estético muy atractivo en la edificación, que combina la calidez de la madera con la solidez y elegancia del hormigón, donde se tiene la posibilidad de utilizar la madera como revestimiento decorativo de techos y fachadas (Yeoh et al., 2011).
5. Reducción de costos: El valor de la construcción de edificaciones con uniones híbridas está relacionado con la materia prima, la construcción y el transporte de esta. Al tener un elemento híbrido en el cual se utiliza menos hormigón, por ejemplo, al cambiar una viga de hormigón armado a viga de madera y conectarlo a una losa de hormigón es hasta un 65% más liviana, lo que permite a tener cimentaciones más económicas al reducir la carga y construcciones más económicas al reducir el total de hormigón de la edificación como también en el transporte, ya que la madera es mucho más maniobrable y liviana reduciendo costos de transporte (Fragiacomo et al., 2018).

2.4 Normativas

A nivel global, diversos campos de investigación se han dedicado continuamente a comprender a fondo y mejorar el diseño de estructuras híbridas que combinan madera y hormigón. Estos esfuerzos buscan optimizar el funcionamiento de dichas estructuras, explorando nuevas vías y enfoques para su implementación, a pesar de la amplia gama de estudios existentes. Existe una necesidad constante de desarrollar estrategias más efectivas que impulsen el conocimiento, la eficiencia en el diseño y la construcción de estas estructuras, con el fin de establecer normativas específicas de diseño. Hasta la fecha, en Chile no se ha establecido una normativa nacional específica para regular las estructuras de madera-hormigón, definiendo sus requisitos, estándares, procedimientos de diseño, consideraciones ambientales, responsabilidades y actualizaciones. Aunque algunas naciones han creado sus propias directrices, su aplicabilidad directa en Chile puede ser limitada debido a la naturaleza sísmica del país.

2.4.1 Euro código 5 y pautas de diseño

El Euro código 5 Parte 1-1, titulado "Reglas Generales y Reglas Comunes para Edificaciones", abarca una amplia gama de aspectos relacionados con el diseño, cálculo, construcción y control de calidad de estructuras de madera en edificaciones, proporcionando un marco detallado y completo para asegurar la seguridad y eficiencia en este tipo de construcciones (CEN, 2004).

A pesar de que el Euro código 5 no se dirige específicamente a los sistemas compuestos de madera-hormigón, cuenta con la cláusula 7.1.(3) que hace referencia al diseño de sistemas de conexión de madera-hormigón. Esta cláusula indica: "para conexiones de acero a madera o de hormigón a madera, el módulo de deslizamiento debe basarse en la densidad del miembro de madera y puede multiplicarse por 2,0" (CEN, 2004). Esto implica que se asume una deformación nula en el hormigón, considerando el conector como empotrado. Se puede suponer que la rigidez de estas conexiones es el doble de las conexiones de madera, esto queda ingresado en la ecuación 1 mencionada anteriormente (Schänzlin et al., 2018).

Otra normativa específica para casos particulares es la guía de diseño de sistemas compuestos de madera-hormigón en Nueva Zelanda (Futurebuild, 2020). Esta guía se basa en el Euro código 5 y se adapta a las normativas constructivas de la madera de estos países. Presenta limitaciones en sus diseños, como la restricción de uso de conexiones para luces de más de ocho metros y el límite de dos tipos de configuraciones de conexiones según el documento. Estas configuraciones se basan en muescas en la madera con tornillos incrustados, y en la pauta de diseño se detallan las condiciones de fabricación (Crews et al., 2010).

Existen otras pautas de diseño específicas en la literatura, basadas en el Euro código 5, para la construcción de puentes. Por ejemplo, en Brasil y Canadá existe un manual de diseño de puentes de madera. En los Estados Unidos, los puentes de sistemas compuestos de madera-hormigón están cubiertos por varios códigos de AASHO y AASTHO. Estos códigos asumen una interacción perfecta entre la madera y el hormigón (Schänzlin et al., 2018).

2.4.2 Chile

En Chile no existe una normativa para las conexiones de sistemas compuestos de madera-hormigón, por lo cual, es imperativo hacer distintos estudios de los comportamientos de distintas conexiones para lograr una conexión de calidad y económica entre ambos materiales.

Por ello, en el Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (Cenamad) a la vanguardia de la construcción en madera y con crisis urgentes como lo son el déficit habitacional y la productividad en la construcción, llevó a cabo un proyecto para la inclusión de losas industrializables de baja huella de carbono en la normativa nacional. Losas que podrán lograr una reducción de un 40% en el peso de las losas, reducción de un 10% de la masa sísmica del edificio, reducción del 50% del espesor de hormigón, reducción de hasta un 50% de residuos y pérdidas de material, entre otros beneficios (CENAMAD, 2023a).

Los investigadores trabajaron en múltiples focos para validar e incluir el proyecto en la normativa NCh1198 en los próximos años:

- Caracterización del desempeño sísmico de losas industrializadas mediante ensayos monotónicos de corte a escala real, y empleo de dicha información para validar un modelo numérico que proponga una metodología de cálculo lateral simplificada.
- Caracterización del desempeño flexional de losas industrializadas mediante ensayos de flexión, métodos no destructivos de vibración (NDT) y medición de deflexiones a largo plazo (creep), para validar los correspondientes modelos numéricos proponiendo una metodología de diseño gravitacional adecuada.
- Evaluación del desempeño cíclico de uniones losa-muro y su constructibilidad, para definir condicionantes críticos de diseño capaces de asegurar un rápido ensamblaje.

En el estudio se consideraron cinco tipos de losas: Losa de Entramado Ligerero, Losa de Entramado con Vigas-I-Joist, Losa de Entramado con Alta Resistencia, Losa CLT + Hormigón Prefabricado y Losa Híbrida Madera NLT - Hormigón Armado. En las conclusiones según CENAMAD, se determinó que todas las opciones presentadas arrojaron buenos resultados y en cuanto al diseño flexional de losas compuestas (NLT y CLT con hormigón), según explicó Pablo Guindos, “podrían ser interesantes para el mercado cuando se requiera gran capacidad lateral o flexional contando con un paquete de losa reducido”. (CENAMAD, 2023b).

2.5 Conclusión

Se puede inferir que el desempeño y comportamiento de los distintos conectores son fundamentales para la innovación de la industria de la construcción en uniones híbridas de madera-hormigón. Es necesario investigar sobre el desempeño de los conectores según su resistencia, rigidez y ductilidad para lograr mantener unido al hormigón con la madera, ya sea, a través de la implementación de un buen diseño de un solo conector o varios tipos de conectores a la vez, incluyendo los factores de materialidad de conectores, de elementos estructurales, tipos de conectores y diseño de colocación del conector. Por lo cual, con un

buen diseño de una conexión híbrida resistente al corte, a deflexiones, la fluencia y el deslizamiento relativo para lograr aprovechar los beneficios de la técnica de conexiones híbridas para obtener las ventajas de las edificaciones híbridas en el futuro. En la normativa de la industria de la madera internacional se encuentran pocas pautas de diseño y sobre todo para casos específicos. Chile se encuentra en buen camino por el interés de disminuir el hormigón en las edificaciones, por lo cual faltan más investigaciones para que la construcción híbrida de madera-hormigón chilena pueda tener una normativa que avale estándares de calidad y conseguir construcciones más sustentables que las tradicionales de solo hormigón.

CAPÍTULO 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En este capítulo se analiza el trabajo experimental donde se diseñan las probetas a través de la metodología de trabajo utilizada, entre los cuales se muestran los materiales y equipamiento para fabricar las muestras. Estas constan en ocho configuraciones distintas con tres unidades por configuración, en consecuencia, se tienen veinticuatro muestras en total. La materialidad es de madera con hormigón unidos a través de conectores de corte, clavos y tornillos, en dos distintos ángulos de 45° y 90°. Después de confeccionados se aplica el ensayo de resistencia al corte para el análisis de las variables del tipo e inclinación del conector.

3.2 Metodología de trabajo

La metodología de este trabajo comienza con la recolección de la información sobre las conexiones, bajo estudio experimental donde se analizan los materiales a utilizar y los conectores de corte a estudiar, siendo las probetas testeadas a corte, encontrando resultados y conclusiones de la fase de carga en laboratorio. A continuación, la figura 3.1 presenta el diagrama de flujo de la metodología:

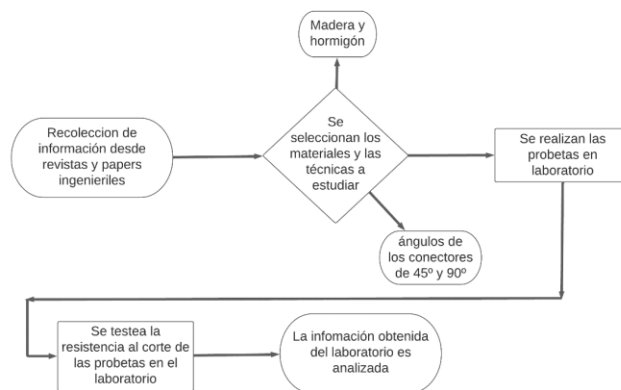


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de trabajo

Para iniciar el diseño de la fase experimental, se han seleccionado los materiales que serán utilizados: madera de Pino Radiata y hormigón Predosificado "Weber" H-30, con una resistencia superior a 30 MPa (300 kgf/cm²), para la fabricación de las probetas. Además, se han elegido conectores, tales como clavos de acero de bajo contenido de carbono (Inchalam, 2022) y tornillos de acero zincado de 100 milímetros de largo de vástago, debido a sus costos, disponibilidad en el mercado y sus cumplimientos con las normas NCh1269 en cuanto a calidad, así como con la NCh1198 en lo referente al diámetro nominal mínimo de 4 mm.

Se ha seleccionado el ángulo de inserción de 45° (en contra del corte), -45° (no en contra del corte) y 90° (perpendicular) para los conectores dentro de las probetas. Además, se ha optado por alternar el orden de los materiales, tanto de la madera como del hormigón, con el fin de variar la aplicación de la carga en los materiales. Esto ha dado lugar a dos configuraciones: hormigón-madera-hormigón (HMH) y madera-hormigón-madera (MHM).



Figura 3.2 Probetas: (a) HMH en -45° y 90°; (b) MHM en 90° y 45°

En las configuraciones MHM, las dimensiones de la muestra son de 5 cm de ancho en las maderas y 15 cm en el hormigón, mientras que en las configuraciones HMH son de 10 cm en los hormigones y 5 cm en la madera, con profundidad de 15 cm y altura de 45 cm. Estas medidas se deben al largo del conector, el cual se encuentra 7 cm dentro del hormigón y 3 cm en la madera, dejando un espacio de recubrimiento en los bordes de los materiales. Además, según la norma NCh1198, se requiere la presencia de al menos cuatro conectores cuando el diámetro nominal de los conectores es menor a 10 mm en cada plano de cizallamiento, y estos se disponen a una distancia de 5 cm entre ellos. Estos diseños están

basados en estudios previos, como el de Berardinucci et al., 2017b, que también utilizan conectores mecánicos con distintas inclinaciones y tienen objetivos similares al de este estudio para comparar diferentes tipos de conectores en diversos ángulos dentro de los especímenes.

En el laboratorio, se prepararon los materiales cortando trozos de madera dimensionados utilizando dos abrazaderas y una sierra circular. Se obtuvieron treinta y seis trozos de madera para su uso posterior. A continuación, se clavaron cuatro clavos y se atornillaron cuatro tornillos en cada trozo de madera, dejando una longitud sobresaliente del conector de setenta milímetros, tanto para ángulos de 90° como de 45°. Este largo corresponde a la profundidad del conector en el hormigón, ya que en la madera no se podía incrustar más de 3 cm debido a su ancho de 5 cm. Después de completar el proceso de fijación de los conectores, se procedió a ensamblar las maderas para los moldajes que contendrían el hormigón fresco. Estas piezas fueron nuevamente preparadas utilizando abrazaderas y una sierra circular, y finalmente fueron fijadas mediante tornillos.

Posteriormente se reúnen los materiales para la confección del hormigón, que incluye agua y cemento predosificado marca “Weber”. Se dosifica según la ficha técnica del hormigón Weber H-30 (Weber, 2020), aplicando la mezcla a la betonera. Ya listo el hormigón fresco tras revolver, se vierte en los moldajes dejándolo a ras con la línea superior del mismo. En seguida se aplica el vibrador en tres puntos de la probeta (ambos extremos y al medio) para liberar burbujas de aire quedando una mezcla más homogénea. Finalmente, se aplica la llana o platacho a la superficie del hormigón fresco para otorgarle una superficie lisa sin grumos.

En seguida, las veinticuatro probetas se ingresan a la cámara de curado de la Universidad de Concepción con una temperatura de 21° Celsius y una humedad aproximadamente del 78%. Al día siguiente se descimbran los moldajes y se espera a que se curen durante veintiocho días para que el hormigón alcance su resistencia nominal a compresión. En consecuencia, ya transcurrido el tiempo de espera, el hormigón ya se encuentra endurecido y se puede comenzar a realizar las pruebas de resistencia al corte de las probetas.

En la preparación de la máquina de prueba de fatiga modelo 8801 de la marca "Instron" para realizar el ensayo de corte, fue necesario adaptar la máquina para sujetar la probeta. Esto se logró añadiendo una placa de acero al pistón inferior y otra placa en la parte superior de la pieza central. El propósito de esta última placa fue garantizar una transmisión efectiva de la fuerza aplicada en la parte superior del elemento central, como se muestra con una flecha roja en la figura 3.3.

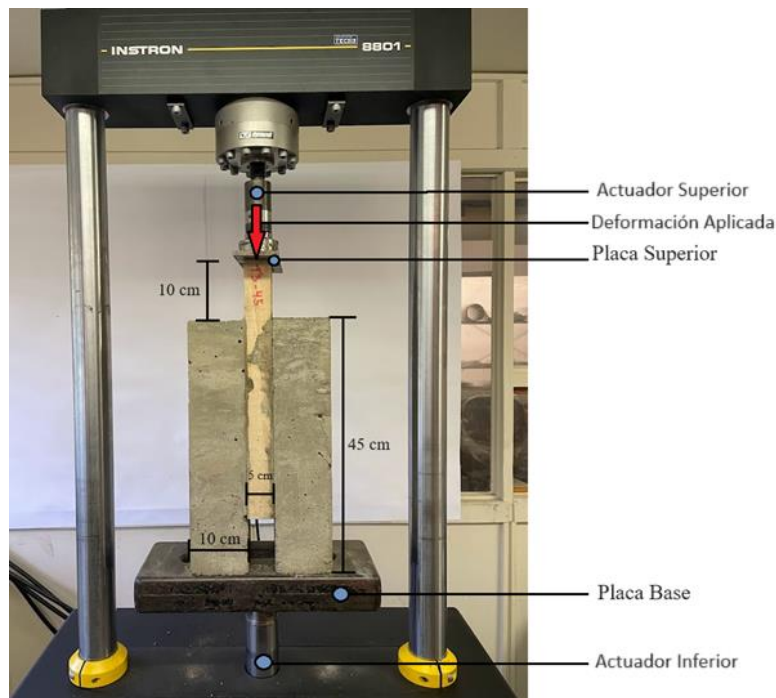


Figura 3.3 *Espécimen instalado en máquina de prueba de corte.*

Los especímenes se posicionan en un ángulo de 90° con respecto al plano horizontal como se aprecia en la figura 3.3. La máquina mide la fuerza y el desplazamiento a través de los pistones hidráulicos que tiene incorporados y se registran imágenes de las probetas del ensayo con una cámara fotográfica las cuales se encuentran en el capítulo de anexos.

Para cada configuración testada se ensayaron tres probetas idénticas, se registró a través del tiempo en decimas de segundos (ds) como aumentaba la carga medida en kilo Newton (kN) y el desplazamiento que realizaba los conectores en milímetros (mm) en un ciclo de carga. Con esta información se logró recolectar la carga máxima que es la carga mayor antes de la falla de cada probeta asociada a un desplazamiento en una décima de segundo y así poder comparar entre configuraciones sus resistencias a la carga aplicada.

3.3 Materiales

3.3.1 Conectores: Clavos y Tornillos

Un clavo corriente de cuatro pulgadas es un tipo de conector mecánico de acero utilizado habitualmente en la construcción para fijar piezas de madera entre sí. Tiene una longitud de cuatro pulgadas y un diámetro de vástago de 4.3 milímetros. La punta es puntiaguda para facilitar su inserción en la madera, mientras que el extremo opuesto tiene una cabeza plana para evitar que se deslice hacia afuera como se muestra en la figura 3.4. Los clavos corrientes de cuatro pulgadas se utilizan para fijar tablas, marcos, paredes y techos, entre otros usos. Son vendidos en paquetes de varias unidades y pueden ser instalados con un martillo o con una clavadora neumática (Sodimac Chile, 2023a)



Figura 3.4 Clavo corriente 4" (Sodimac Chile, 2023a)

El tornillo zincado amarillo de cuatro pulgadas es un tipo de conector mecánico de acero autoperforante de alta resistencia utilizado en la construcción. Está diseñado para ser utilizado en madera dura, madera laminada, acero y otros materiales similares. Tiene una longitud de cuatro pulgadas y un diámetro de vástago de 4.2 milímetros sin hilo y de 5.72 con hilo. La punta es afilada y tiene una rosca en espiral que permite perforar la madera sin necesidad de perforaciones previas como se muestra en la figura 3.5 (Sodimac Chile, 2023b)



Figura 3.5 Tornillo Turbo Screw 4" (Sodimac Chile, 2023b)

3.3.2 Mezcla de hormigón

En este estudio, se utilizó el hormigón Weber H-30 el cual es predosificado en seco producido a partir de cemento de origen nacional de tipo alta resistencia, árido de granulometría controlada y aditivos que permiten mejorar el tiempo abierto de trabajabilidad, resistencia mecánica inicial y final (Weber, 2020).

Este hormigón viene en un saco de 25 kilos el cual rinde 12 litros aproximadamente, el cual necesita aproximadamente de 3 a 4 litros de agua por saco. Obtiene su resistencia a la compresión superior o igual a 30 MPa (300 kgf/cm²) a los veintiocho días (Weber, 2020), proceso realizado a temperatura de veintiún grados Celsius y humedad de 78% en la cámara de curado en el laboratorio de estructuras de la Universidad de Concepción.



Figura 3.6 Hormigón H-30

3.3.3 Madera

En este estudio se utilizó madera Pino Radiata, es una especie de madera blanda nativa originaria de Monterrey, Estados Unidos, sin embargo, se planta en distintos países por lo cual la madera utilizada es de plantaciones en Chile. Dentro de sus usos se encuentra la fabricación de muebles, pulpa, papel y es ampliamente utilizado en el área de la construcción con potenciales usos en pisos, revestimientos y construcciones livianas (Burgos & Ariete, 2010). Dentro de sus propiedades se destaca su trabajabilidad por su sujeción de clavos, resistencia al rajado y estabilidad dimensional (CMPC, 2020). Es una madera relativamente fuerte, duradera con una dureza aproximadamente de 200 kg y tiene una densidad media adecuada para aplicaciones estructurales. En la tabla 3.1 se puede observar las propiedades físicas de densidad y contracción en su estado verde y seco (Burgos & Ariete, 2010).

Tabla 3.1 *Propiedades físicas Pino radiata*

Propiedades	Valores					
	Estado verde			Estado seco (H: 12%)		
Densidad (kg/m ³)	Aparente	Básica	Anhidra	Aparente	Básica	Anhidra
	679	429	451	513	459	456
Contracciones (%)	Desde el estado verde a 0% de contenido de humedad					
	Tangencial		Radial		Volumétrica	
	7		4,2		11,2	

(Burgos & Ariete, 2010)

Las propiedades mecánicas pueden variar dependiendo de factores como la densidad y contenido de humedad. En la tabla 3.2 se observa una estadística de sus propiedades mecánicas según un estado verde y seco de la madera (Burgos & Ariete, 2010).

Tabla 3.2 Descripción estadística de las propiedades mecánicas de Pino radiata

			n	Valor Mínimo	Valor Máximo	Media	Desv. Tip.
Estado verde	Flexión estática (Mpa)	Tensión límite de proporción	7,0	162,0	263,0	207,7	34,9
		Módulo de rotura	7,0	311,0	451,0	383,4	51,6
		Módulo de elasticidad	7,0	54,3	90,5	71,4	11,7
	Dureza (kg)	resistencia normal a fibras	7,0	118,0	226,0	169,6	38,5
		resistencia paralela a fibras	7,0	135,0	248,0	189,4	33,2
Estado seco (H: 12%)	Flexión estática (Mpa)	Tensión límite de proporción	13,0	314,0	554,0	416,0	70,1
		Módulo de rotura	14,0	420,0	978,0	725,1	165,2
		Módulo de elasticidad	4,0	64,0	114,0	95,8	22,5
	Dureza (kg)	resistencia normal a fibras	13,0	164,0	360,0	264,2	64,5
		resistencia paralela a fibras	13,0	251,0	508,0	351,5	78,2

(Burgos & Ariete, 2010)

En la presente investigación se utilizó una madera pino radiata con un 20% de humedad por lo cual su densidad es aproximadamente de 400 kg/m^3 , resistencia mecánica moderada y su dimensionamiento esta normado bajo la NCh2824, que especifica las dimensiones y tolerancias de cada pieza. Se observa en la tabla 3.3 las medidas originales de la tabla a utilizar.

Tabla 3.3 Medidas de la pieza original de madera.

Ancho (cm)	Largo (cm)	Espesor (cm)
15	320	5

A partir de la pieza original de Pino radiata se logró obtener la parte de madera de la probeta híbrida con sus respectivos dimensionamientos los cuales se exponen más adelante.

3.4 Equipamiento

El equipamiento utilizado en la confección de las probetas fue otorgado por el encargado del laboratorio de estructuras de la Universidad de Concepción. Las herramientas (figura 3.7) utilizadas para la elaboración de los cortes en la madera incluyeron prensas de madera, empleadas para fijar las piezas de madera durante los cortes; huincha de medir para tomar las dimensiones necesarias; sierra circular, utilizada para cortar madera; y elementos de

seguridad como guantes y lentes protectores para garantizar la seguridad durante el manejo de las herramientas.



Figura 3.7 *Herramientas y elementos de seguridad*

(Falabella, 2023a, 2023b, 2023c; Sodimac, 2023b, 2023a).

Para la elaboración de hormigón se dispuso de un conjunto de herramientas específicas (figura 3.8). Entre ellas se empleó una betonera, utilizada para mezclar el agua junto al polvo del saco de hormigón; un vibrador de hormigón, que compacta y consolida el hormigón; una plana botadora de acero, empleada para nivelar y alisar la superficie superior del hormigón fresco en las probetas; una pala pequeña para transferir el hormigón desde la betonera a los moldajes; y una bandeja metálica, usada para mantener el área de trabajo limpia al colocar elementos sucios sobre ella. Estas herramientas fueron fundamentales en el proceso de elaboración del hormigón, garantizando la correcta preparación y manipulación del material.



Figura 3.8 *Maquinaria y herramientas para elaboración de hormigón*

3.5 Muestras

Las muestras fabricadas se definen en ocho configuraciones distintas, las cuales cuatro de ellas están diseñadas con dos piezas laterales de madera y una pieza central de hormigón con el dimensionamiento en milímetros que se aprecia en la figura 3.9.

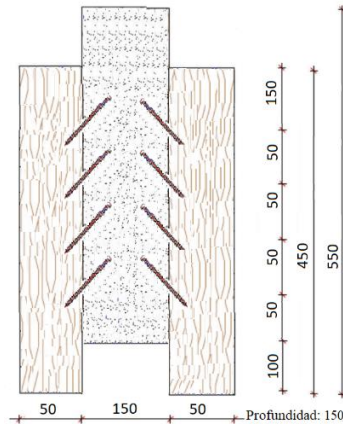


Figura 3.9 *Espécimen de Madera-Hormigón-Madera (MHM).*

Las cuatro configuraciones restantes están diseñadas a la inversa con dos piezas laterales de hormigón y un pieza central de madera con otro dimensionamiento de los elementos que se aprecian en la figura 3.10.

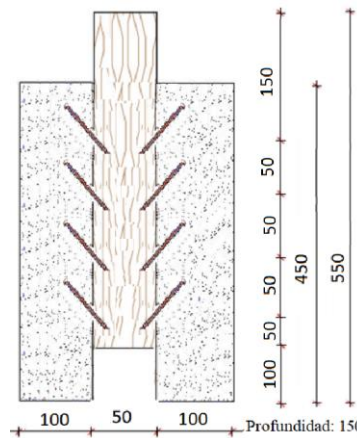


Figura 3.10 *Espécimen de Hormigón-Madera-Hormigón (HMH)*

Las ocho configuraciones distintas se distinguen según la conexión mecánica que tienen: cuatro clavos o cuatro tornillos, y también según el ángulo de aplicación de la conexión la cual es de 90° , 45° (MHM) y -45° (HMH) como se muestra en la figura 3.11.



Figura 3.11 Ejemplo de ángulos de conexión de los especímenes para MHM y HMH:
 (a) Conector en 90°; (b) Conector en 45° (MHM) y -45° (HMH)

Entonces se puede sintetizar en la tabla 3.5 las ocho configuraciones de los especímenes realizados con sus respectivos nombres de identificación:

Tabla 3.4 Descripción de las configuraciones de las muestras.

Conector	Orden del material	Ángulo (°)	Nombre espécimen
8 clavos	M – H – M	45	C"x" – 45 – MHM
8 clavos	M – H – M	90	C"x" – 90 – MHM
8 tornillos	M – H – M	45	T"x" – 45 – MHM
8 tornillos	M – H – M	90	T"x" – 90 – MHM
8 clavos	H – M – H	- 45	C"x" – 45 – HMH
8 clavos	H – M – H	90	C"x" – 90 – HMH
8 tornillos	H – M – H	- 45	T"x" – 45 – HMH
8 tornillos	H – M – H	90	T"x" – 90 – HMH

En la tabla 3.4 se expresan los conectores utilizados, clavo o tornillo, luego la materialidad de las muestras que son madera (M) y hormigón (H) con su respectivo orden, el ángulo utilizado en esa configuración y finalmente el nombre del espécimen configurado. El que contiene clavos inclinados es “Cx-45”, para el tornillo inclinado es “Tx-45”, para el clavo recto es “Cx-90” y para el tornillo recto es “TX-90”.

Se tiene un número identificador “x” en los nombres de los especímenes porque para cada configuración se hicieron tres muestras iguales, ya que, mientras más ensayos son realizados, más confianza se puede tener en los resultados si son similares. Por otro lado, una gran variación de los datos entre los ensayos obliga al estudio de las razones de esta disparidad.

De esta forma, se tiene veinticuatro muestras compuestas para testear en la fase de carga, donde para las configuraciones con conectores rectos y para las configuraciones con conectores inclinados se tiene que la profundidad de los clavos y tornillos es de treinta milímetros en la madera y setenta milímetros en el hormigón. En la figura 3.14, se aprecian las ocho configuraciones de las muestras a testear.

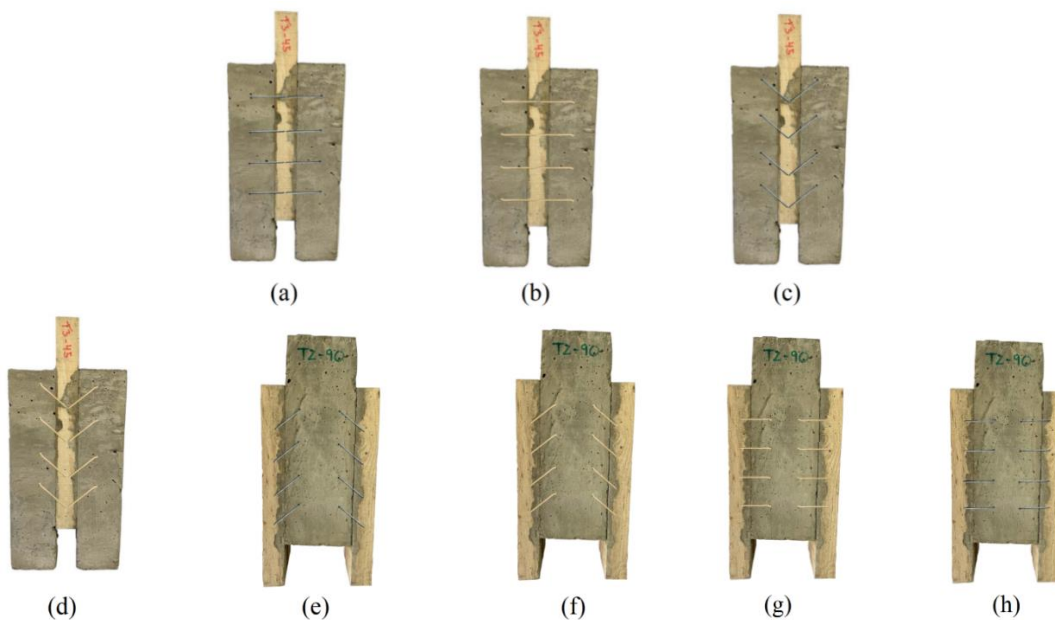


Figura 3.12 Configuraciones de las muestras:

(a) C"x" -90 - HMH; (b) T"x" - 90 - HMH; (c) C"x" -45 - HMH; (d) T"x" -45 - HMH;
 (e) C"x" -45 - MHM; (f) T"x" -45 - MHM; (g) T"x" -90 - MHM; (h) C"x" -90 - MHM.

3.6 Variables

Las configuraciones y los ensayos están confeccionados para evaluar las variables de interés que están presentes en las muestras realizadas:

- El tipo de conector, siendo la variable de más interés, ya que, es la parte principal de la conexión de ambos materiales. Se seleccionaron clavos y tornillos de largo de cuatro pulgadas por su fácil adquisición en el mercado y precio. Los conectores se analizan y comparan según el desplazamiento ante la carga y la resistencia al corte de cada uno para mantener la conexión entre ambos materiales.
- El ángulo de conexión del conector se encuentra en diferentes ángulos dentro de la probeta. Esto permite analizar cómo influye en la resistencia al corte y la rigidez de la conexión híbrida al variar el ángulo de inserción de los conectores. Se utiliza un ángulo de 90° para configuraciones rectas, ángulos de 45° para las MHM y -45° con respecto a la horizontal para las HMM en las configuraciones inclinadas.
- Variación del orden de las capas de la madera y hormigón, estas se presentan en dos configuraciones diferentes, HMM y MHM, donde se altera la disposición de las capas tanto en la parte central como en los laterales. Esta modificación permitió aplicar la carga en distintas materialidades centrales y permitió el análisis del comportamiento de los conectores ante diferentes condiciones.

3.7 Conclusión

La metodología de trabajo empleada fue adecuada para lograr confeccionar las probetas. La elección de los conectores mecánicos resultó acertada, ya que se insertaron fácilmente en la madera y su ángulo variable no complicó la construcción de estas. Además, son económicos y cumplen con ciertos requisitos de la normativa chilena de la madera. La preparación del hormigón predosificado con el equipamiento adecuado no presentó dificultades, y el uso de la madera no generó complicaciones. Esto permitió la exitosa confección de las 8 configuraciones diferentes, cada una repetida 3 veces, obteniendo veinticuatro probetas, las cuales están sometidas a los ensayos de resistencia al corte para analizar la influencia de las 3 variables destacadas.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y COMENTARIOS

4.1 Introducción

En el siguiente capítulo se presentan los resultados de resistencia al corte, los desplazamientos, los módulos de deslizamiento y los tipos de falla que se encuentran físicamente en las muestras, mostrándolas visualmente a través de registros fotográficos.

4.2 Carga máxima por probeta

En el anexo 7.10 se puede apreciar la variabilidad de los resultados de carga máxima obtenidos. Se realiza la exclusión de ciertos resultados que se desviaron significativamente de la media de sus respectivas configuraciones. Por ejemplo, la probeta "T1-90°-HMH", que fue la primera en ser sometida a prueba junto con unas tenazas que se observan en el anexo 7.5. Estas tenazas, finalmente, se retiraron de todas las probetas del experimento debido a su influencia en los resultados de la mencionada probeta.

En la figura 4.1 se presenta el gráfico que muestra los valores promedio de cada configuración ensayada. Se aplicó una carga vertical progresiva desde 0.1 kN hasta alcanzar la carga máxima que provocó el fallo en cada configuración.

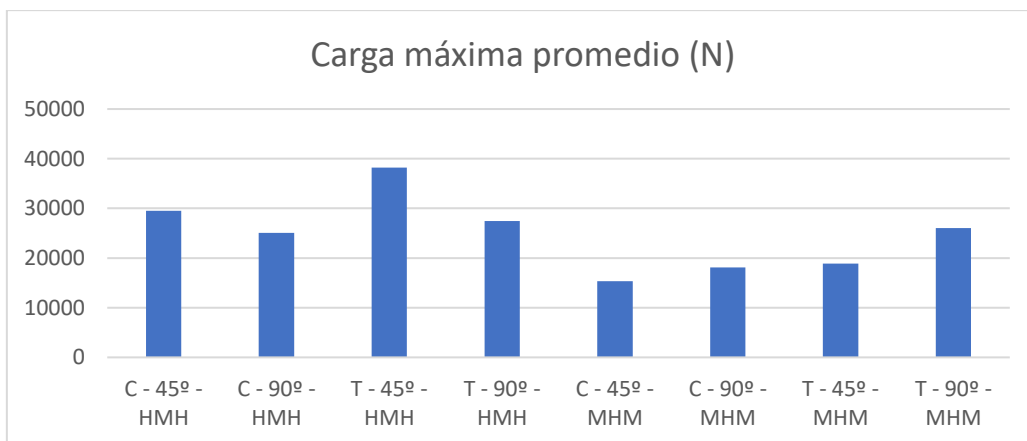


Figura 4.1 Gráfico de la carga máxima promedio por configuración testada

Se observa que los tornillos exhiben una resistencia superior en comparación con los clavos. Esta diferencia puede atribuirse a su mayor rigidez y al diseño de su hilo, que impide el deslizamiento entre el conector y la superficie del material. Además, se ha notado una mejora significativa en la resistencia en aquellas configuraciones que incorporan conectores con un ángulo de inclinación de 45°.

Se ha elaborado la tabla 4.1 que muestra los datos de desplazamientos y carga máxima para cada configuración, junto con sus respectivas desviaciones estándar. Esta tabla proporciona una visión clara de la dispersión de los datos en cada caso, permitiendo una evaluación precisa de la variabilidad de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

Tabla 4.1 *Desviación estándar variando clavos y tornillos*

Espécimen	Desplazamiento (mm)	Desviación estándar (mm)	Carga máxima (kN)	Desviación estándar (kN)
C1 - 45° - HMH	1.85		43.04	
C2 - 45° - HMH	2.08		32.42	
C3 - 45° - HMH	5.40	1.34	13.12	16.33
T1 - 45° - HMH	3.05		33.92	
T2 - 45° - HMH	1.90		21.21	
T3 - 45° - HMH	2.77		59.50	
C1 - 90° - HMH	14.30		21.67	
C2 - 90° - HMH	13.23		24.11	
C3 - 90° - HMH	14.90	3.05	29.41	3.11
T1 - 90° - HMH	-		-	
T2 - 90° - HMH	8.20		27.94	
T3 - 90° - HMH	9.25		27.02	
C1 - 45° - MHM	3.07		10.73	
C2 - 45° - MHM	2.13		15.91	
C3 - 45° - MHM	4.38	1.36	19.45	3.90
T1 - 45° - MHM	2.03		17.65	
T2 - 45° - MHM	5.52		22.41	
T3 - 45° - MHM	3.89		16.63	
C1 - 90° - MHM	13.25		21.59	
C2 - 90° - MHM	11.95		15.07	
C3 - 90° - MHM	12.12	4.71	17.71	4.84
T1 - 90° - MHM	8.25		26.73	
T2 - 90° - MHM	2.53		26.40	
T3 - 90° - MHM	3.23		24.99	

Se observa que la desviación estándar en las configuraciones donde solo se cambia el clavo por el tornillo muestra una menor variabilidad en el desplazamiento, lo que sugiere consistencia en los resultados. Se destaca especialmente la baja variabilidad en las configuraciones inclinadas. Sin embargo, en cuanto a las cargas máximas en las configuraciones HMH, la desviación estándar es similar en la mayoría de los casos, excepto en las configuraciones a 90° de HMH, donde se observa una desviación superior. Esto podría indicar posibles fallas en la elaboración de las muestras o en el proceso de prueba.

En las configuraciones HMH se evidencia diferencia, como se observa en la figura 4.1, con una mayor resistencia a la carga en comparación con las configuraciones MHM en la prueba de resistencia al corte. Carvalho & Mantilla Carrasco (2010) llevaron a cabo un estudio experimental para evaluar el impacto del orden de los materiales en la resistencia y deformación. Sus hallazgos revelaron que la disposición con hormigón-madera-hormigón mostró una resistencia superior, hallazgo que coincide con los resultados obtenidos en esta investigación.

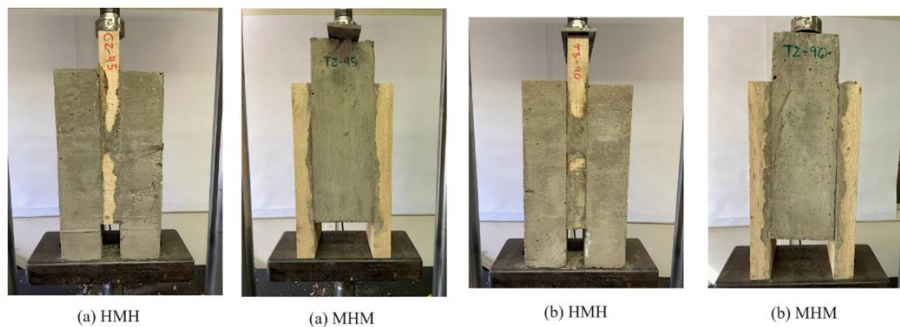


Figura 4.2 *Probetas con configuraciones de: (a) conectores inclinados; (b) conectores rectos*

El largo del conector que se inserta en la madera es idéntico para ambas configuraciones, con una longitud de treinta milímetros. Además, se registró un desplazamiento de magnitudes similares en ambas configuraciones de materiales (Figura 4.9), lo que sugiere que la rigidez del conector se mantiene de manera consistente. Por lo tanto, se deduce que la pérdida de resistencia en las configuraciones MHM puede ser atribuible al aplastamiento de la madera, resultado de la presión ejercida por el conector debido a la carga aplicada. Se observó una reducción del 50% en las configuraciones con conectores inclinados, del 28% en las configuraciones con conectores rectos utilizando clavos, y del 5% con conectores rectos utilizando tornillos.

4.3 Corte máximo en las probetas

Lo primordial de este estudio es evaluar la resistencia al corte de los conectores mecánicos, variando entre clavos y tornillos, así como la inclinación de inserción de estos conectores a 45° y 90° dentro de la unión. En la figura 4.3 se muestra el diagrama de cuerpo libre de una probeta MHM con conectores en 45° y una probeta HMH con conectores en 90°. En el diagrama de cuerpos libres, la flecha roja etiquetada como "F" representa la fuerza de corte aplicada a un conector específico. También se detalla la carga distribuida aplicada en la parte superior de las probetas y las reacciones generadas en la base de estas.

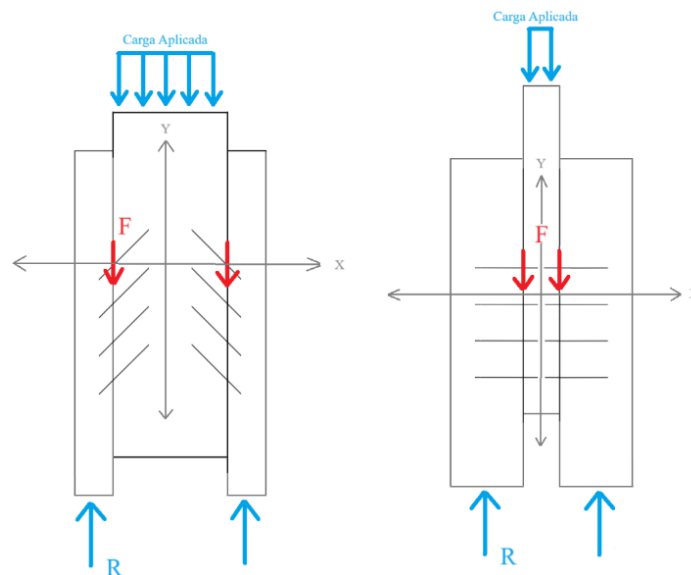


Figura 4.3 Diagrama de cuerpos libres.

En las probetas de HMH se tiene un área de contacto entre los materiales de madera y hormigón de dimensiones de 150 mm x 50 mm lo que significa que hay un área de 7500 mm² y en las probetas de MHM se tiene un área de contacto de 22500 mm². La ecuación 5 es la resistencia al corte donde se utiliza la fuerza de carga máxima por probeta multiplicada y dividida por el área de contacto de los materiales.

$$\tau_{ns} \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{\text{Fuerza max. (N)}}{\text{Area (mm}^2\text{)}} \quad (5)$$

En el anexo 7.11, se muestran los valores de corte máximo por cada probeta. Se observa notoriamente que las configuraciones que tienen más resistencia al corte son las que tienen configuraciones HMH.

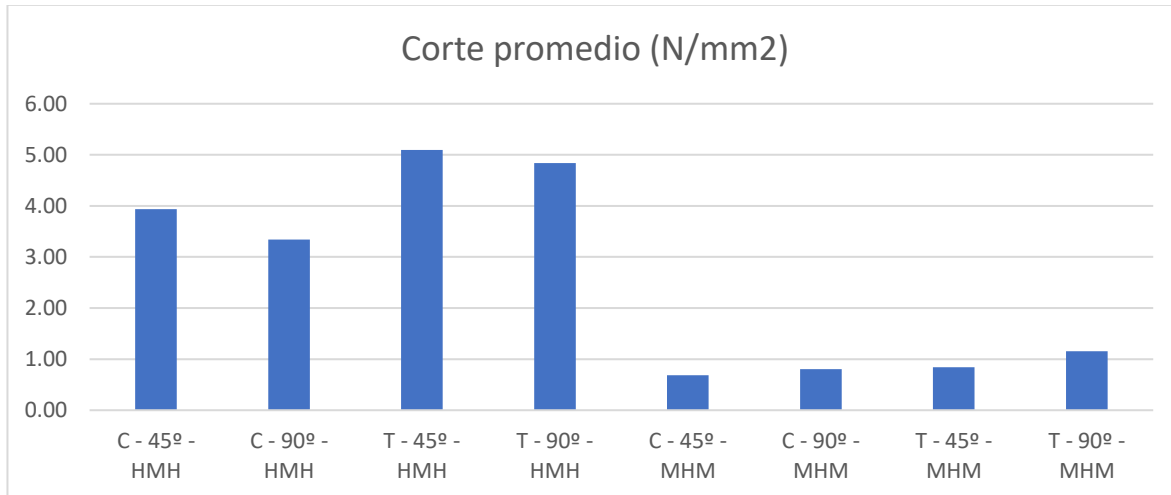


Figura 4.4 Gráfico de la resistencia de corte promedio (N/mm²) por configuración.

Al comparar los valores promedios de corte entre las configuraciones de conectores rectos e inclinados, como se muestra en la figura 4.4, se observa que los valores de las conexiones inclinadas son levemente superiores a los valores de las conexiones rectas en las configuraciones HMH. Esto se debe a que el módulo de deslizamiento de los conectores inclinados es superior al de los conectores rectos. Esta diferencia se atribuye a la fuerza de aplicación en la parte del conector que se encuentra en la interfaz de la junta. En configuraciones donde los conectores están a 90°, la fuerza aplicada es principalmente de corte directo sobre el conector. En cambio, cuando los conectores están inclinados a 45°, se experimenta tanto una fuerza de corte como una de extracción axial, lo que resulta en un mayor módulo de deslizamiento en la conexión.

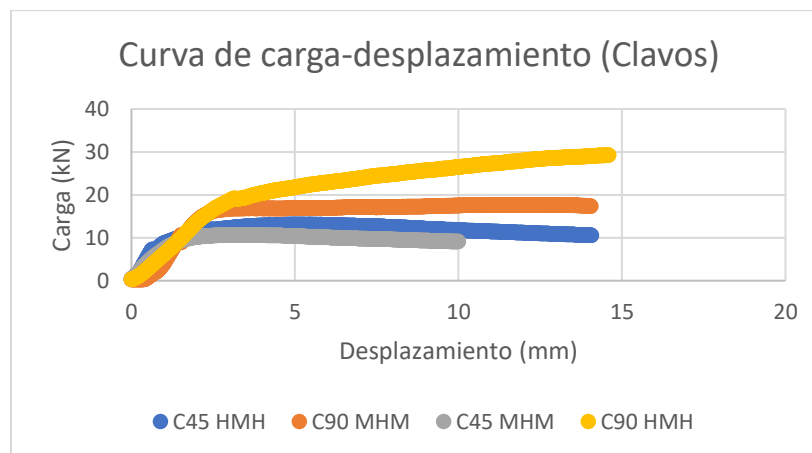
Se ha observado una diferencia significativa en la resistencia al corte al alterar el orden de los materiales, particularmente al colocar el elemento central de hormigón. Se deduce que el peso del hormigón ejerce una mayor presión sobre el conector, lo que resulta en una fuerza de corte superior en esta configuración.

Se observa una baja dispersión de resultados de corte, indicada por las desviaciones estándares de 2.18 N/mm² (45°-HMH), 0.41 N/mm² (90°-HMH), 0.17 N/mm² (45°-MHM) y 0.22 N/mm² (90°-MHM) al variar entre clavos y tornillos dentro de la misma configuración. Esto sugiere una consistencia en los resultados independientemente del tipo de conector utilizado. Sin embargo, al considerar las desviaciones estándares de 1.77 N/mm² para las 12 probetas realizadas en HMH y de 2.24 N/mm² para MHM, se observa una variabilidad moderada en el corte con respecto a la media, lo que sugiere que la variación en el orden de los materiales influye en los resultados.

4.4 Módulos de deslizamientos

Los módulos de deslizamiento evalúan el comportamiento de los conectores, en sistemas compuestos, que se define como el coeficiente angular de la curva carga-desplazamiento. Este coeficiente considera todos los parámetros elásticos y mecánicos de ambos materiales utilizados en la conexión y de los conectores (Luiz Miotto & Alves Dias, 2011).

A partir de la curva de carga-desplazamiento que se muestra en la figura 4.5, la cual tiene las curvas de las probetas más representativa de cada configuración se obtienen los módulos de deslizamiento de cada probeta al utilizar la ecuación 4 del presente documento. En la tabla 4.2 se muestran los módulos de deslizamiento promedio de las configuraciones y los módulos de deslizamiento según el Euro código 5 utilizando las ecuación 1, 2 y 3 presentadas en el capítulo 2.



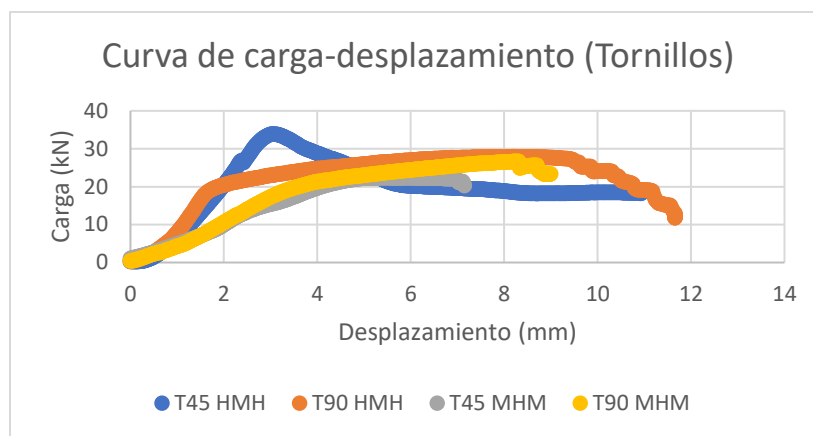


Figura 4.5 Gráficos de curvas de carga-desplazamiento

Tabla 4.2 Módulos de deslizamiento

Probeta	Módulo de deslizamiento Promedio (kN/mm)	Probeta	Módulo de deslizamiento Promedio (kN/mm)	Módulo de deslizamiento EuroCodigo5 (kN/mm)			
HMH	C1-45	MHM	C1-45	6.51	Para Clavos:		
	C2-45		18.43			C2-45	6.59
	C3-45		9.88			C3-45	12.80
	C1-90					C1-90	
	C2-90					6.95	
	C3-90		T1-45			6.50	
	T1-45		21.59	T2-45	7.70		
	T2-45		T3-45				
	T3-45		T1-90				
	T1-90		12.31	T2-90			
	T2-90			T3-90			
	T3-90						

Según lo presentado en la tabla 4.2, las probetas con conectores inclinados en la configuración HMH exhiben una notable capacidad para resistir la carga solicitante y demuestran una excelente rigidez en la conexión. Los valores obtenidos del módulo de deslizamiento superan los calculados teóricamente a través del euro código 5 utilizando el método gamma. Por otro lado, el desempeño de las probetas con configuración MHM coincide con las expectativas teóricas del euro código 5 para los clavos; sin embargo, para los tornillos, los valores del módulo de deslizamiento se sitúan un 40% y 50% por debajo de la teoría, lo que indica una rigidez menor a la esperada y sugiere que esta no es una

conexión eficaz entre la madera y el hormigón. Además, al comparar los módulos de deslizamiento de la mejor configuración, es decir, HMH, se observa que las conexiones con conectores en ángulo de 45° tienen un módulo de deslizamiento significativamente mayor, lo que indica una mayor resistencia al movimiento. Esta mejora se atribuye a la fuerza de corte y a la fuerza axial aplicada en los conectores en esta configuración.

Por otro lado, en cuanto al tema de la variabilidad de resultados, se observa que para la configuración HMH, la desviación estándar es de 7.81 kN/mm, lo que indica una gran variabilidad en los resultados y, por lo tanto, una menor confiabilidad en los análisis realizados. En contraste, la configuración MHM presenta una desviación estándar de 1.81 kN/mm, lo que indica una variabilidad menor en los resultados y, en consecuencia, una mayor confianza en los análisis llevados a cabo.

4.5 Desplazamientos

Para cada ensayo, se registró el desplazamiento relativo entre la madera y el hormigón bajo la carga aplicada. Este desplazamiento es indicativo de la capacidad del conector para resistir a través de su rigidez y su capacidad para soportar la carga a través de la ductilidad de los conectores. Esta información nos permite evaluar la capacidad de cada configuración para soportar cargas máximas sin experimentar fallas críticas en los materiales o los conectores.

Como se muestra en las figuras 4.6 y 4.7 que consideran los resultados de las configuraciones de HMH y MHM con sus respectivas cargas alcanzadas y el desplazamiento asociado a la falla, cuyos valores de la carga máxima están en kN y los valores del desplazamiento en mm.

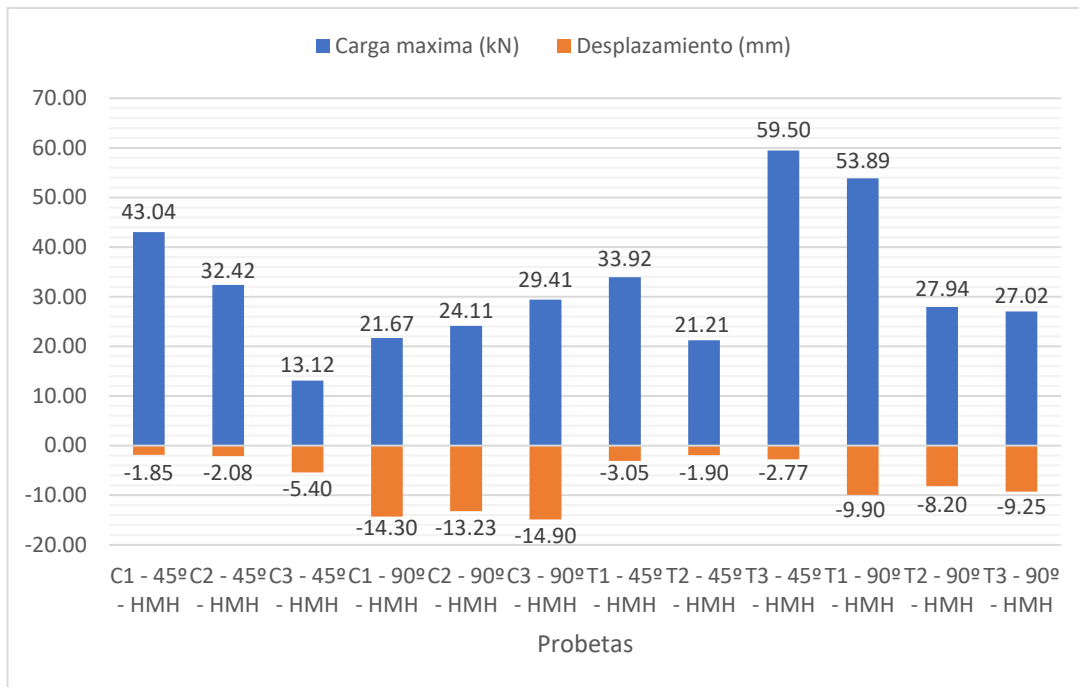


Figura 4.6 Gráfico de la carga máxima (kN) y desplazamiento (mm) en configuración HMH.

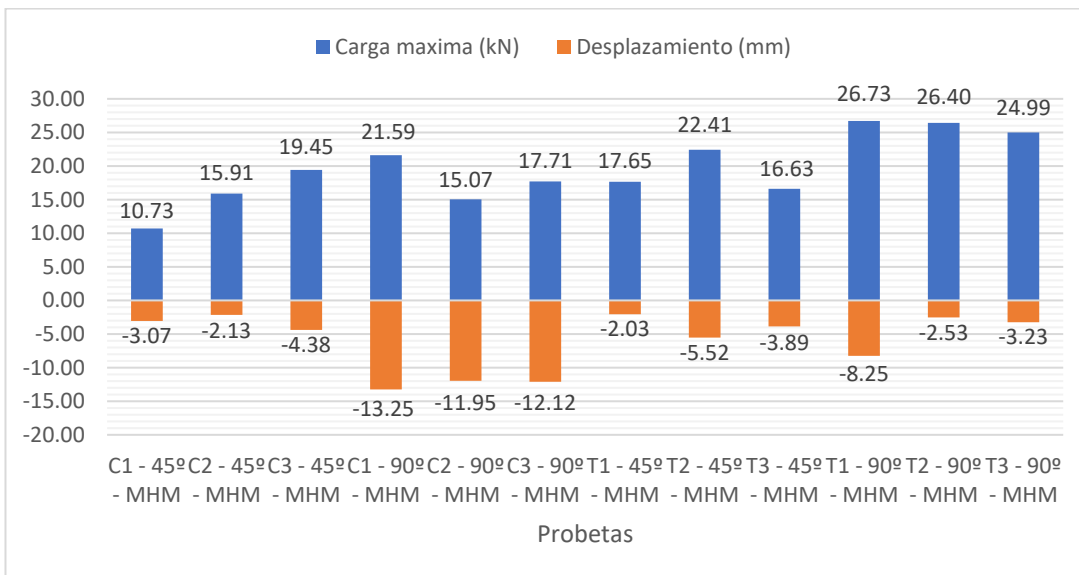


Figura 4.7 Gráfico de la carga máxima (kN) y desplazamiento (mm) en configuración MHM.

A partir de los gráficos anteriores, se conforma el gráfico 4.8 que muestra los valores promedios de las ocho configuraciones:

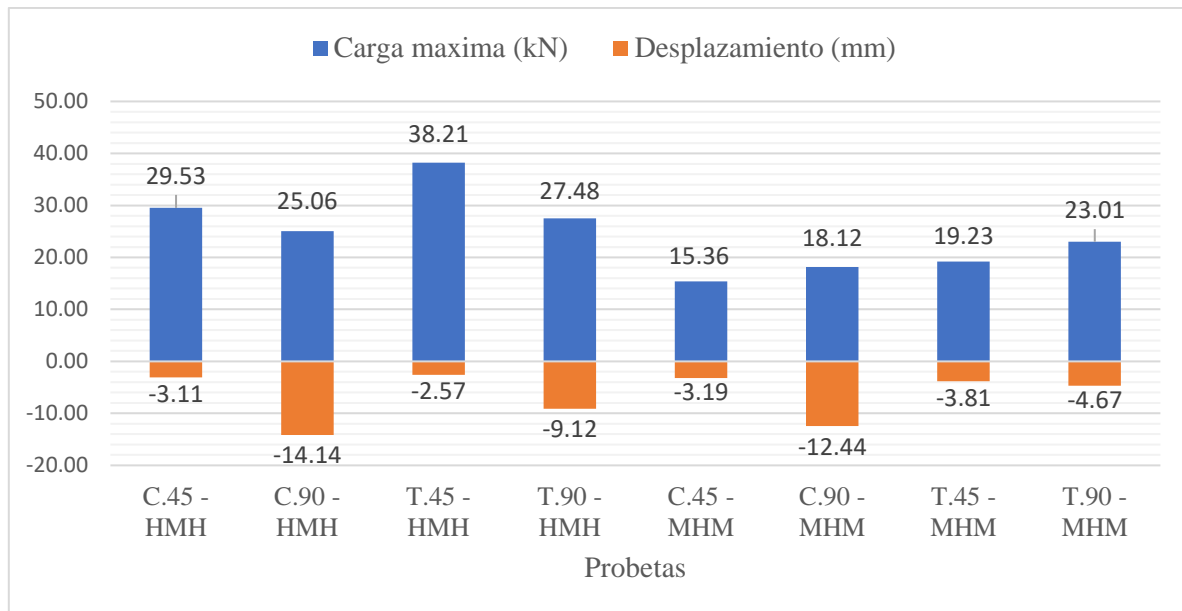


Figura 4.8 Carga máxima (kN) y desplazamiento (mm) promedios en las distintas configuraciones.

Según la figura 4.8 se puede decir:

- El desplazamiento en la carga máxima es notablemente menor en las configuraciones que emplean conectores inclinados, incluso bajo cargas similares en comparación con aquellas que utilizan clavos o tornillos.
- Los tornillos presentan un desplazamiento inferior en comparación con los clavos, incluso bajo cargas más altas, debido a la mayor ductilidad de los clavos.
- Se destaca que las configuraciones HMH exhiben una mayor capacidad de resistencia ante cargas elevadas, al mismo tiempo que mantienen un nivel de desplazamiento similar en comparación con las mismas configuraciones basadas en ángulos y conectores en las configuraciones MHM.

En la Tabla 4.3, se puede observar, para cada configuración, el promedio de la carga máxima soportada por los conectores por cada milímetro de desplazamiento. Se destaca que el tornillo en la configuración de 45° en HMH fue el que presentó la mayor resistencia frente al desplazamiento, Cetrangolo et al., 2021 realizó un experimento similar con tornillos en 45° en el cual coinciden los resultados de carga-desplazamiento con 0.422 mm de desplazamiento a los 10 kN de la carga, siendo la configuración más efectiva en sistemas de conexiones mecánicas.

Tabla 4.3 *Carga máxima promedio por una unidad de desplazamiento por configuración*

Configuración del espécimen	Carga por 1 mm de desplazamiento	
	kN/mm	kgf/mm
C.45 - HMH	9.49	968.24
C.90 - HMH	1.77	180.74
T.45 - HMH	14.84	1513.96
T.90 - HMH	3.01	307.49
C.45 - MHM	4.81	490.74
C.90 - MHM	1.46	148.62
T.45 - MHM	5.05	514.59
T.90 - MHM	4.93	502.49

Al comparar las diversas variables utilizadas en las configuraciones, se han generado las tablas 4.4, 4.5 y 4.6. Estas tablas muestran los porcentajes de aumento en la resistencia al analizar las diferentes configuraciones de probetas presentadas.

Tabla 4.4 *Comparación de resistencia del conector al desplazamiento según su ángulo de inclinación*

Configuración	Comparando ángulo de inclinación	
HMH	C.45 > C.90	436%
HMH	T.45 > T.90	392%
MHM	C.45 > C.90	230%
MHM	T.45 > T.90	2%

Tabla 4.5 *Comparación de resistencia del conector al desplazamiento según su tipo de conector*

Configuración	Comparando conector bajo mismo ángulo	
HMH	T.45 > C.45	56%
HMH	T.90 > C.90	70%
MHM	T.45 > C.45	5%
MHM	T.90 > C.90	238%

Tabla 4.6 *Comparación de resistencia del conector al desplazamiento según su orden de materiales de confección*

Configuración	Comparando configuración HMH y MHM	
C.45	HMH > MHM	97%
C.90	HMH > MHM	22%
T.45	HMH > MHM	194%
T.90	MHM > HMH	63%

En la tabla 4.4 se evidencia que las configuraciones que incorporan conectores inclinados muestran considerablemente mayor resistencia en comparación con aquellas configuraciones que presentan conectores rectos. Esta diferencia se atribuye al módulo de deslizamiento superior de los conectores inclinados.

Por otro lado, en la tabla 4.5 se observa que los tornillos superan en resistencia a los clavos en distintos órdenes de magnitud, demostrando su mejor desempeño en las uniones híbridas de madera-hormigón.

En la tabla 4.6 se comparan las resistencias de los conectores variando el orden de los materiales. Se aprecia que las configuraciones inclinadas son las que presentan las mayores diferencias en términos de resistencia. Esto se debe a que en las configuraciones de HMH, la orientación inclinada de 45° se alinea con la dirección de la carga aplicada, lo que les otorga una mayor resistencia al aprovechar las resistencias de flexión y axial de los conectores. Por el contrario, cuando se coloca en 45° en contra de la alineación de la dirección de la carga aplicada en las configuraciones MHM, se destaca que es la peor inclinación según los resultados.

4.6 Modos de falla

A través de la inspección visual y con registro fotográfico, se puede observar cómo después de terminar la prueba de testeo de las probetas se presentan las fallas. Estas fallas pueden estar presente en la probeta como: Corte completo del conector y Deslizamiento del conector.

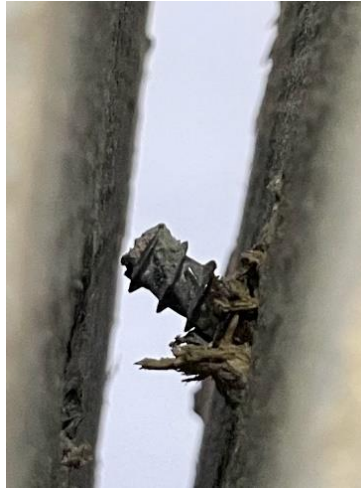


Figura 4.9 *Modo de falla de Corte completo del conector.*



Figura 4.10 *Probetas T1-90 (HMH y MHM) con Corte completo de sus conectores.*

En la figura 4.9 se ilustra una probeta que ha experimentado un fallo completo por corte del tornillo en la interfaz de unión entre la madera y el hormigón. En este caso, la parte empotrada del conector queda incrustada dentro del hormigón, mientras que el resto se flexiona hasta llegar al punto de fallo por corte. No se observan daños evidentes en el material de hormigón; sin embargo, en la madera, se aprecia un aplastamiento del material causado por la acción del conector. En la figura 4.10 se observa este fallo para las probetas T1 – 90 – HMH y T1 – 90 – MHM.



Figura 4.11 *Modo de falla de deslizamiento del conector.*



Figura 4.12 *Probetas T3-45 y T2-45 (MHM) con Deslizamiento de sus conectores.*

En la figura 4.11 se ilustra una probeta que ha experimentado un fallo por deslizamiento del clavo en la interfaz de unión entre la madera y el hormigón. En este caso, la parte empotrada del conector queda incrustada en el hormigón, mientras que el resto se flexiona y se extrae desde la madera debido a la fuerza axial ejercida por la parte empotrada del conector. Se pueden observar daños menores de desprendimiento en el material de hormigón en la parte superior del conector. Además, en la madera, se aprecia un leve aplastamiento del material causado por la acción del conector. En la figura 4.12, se presenta este fallo para las probetas T3 – 45 – MHM y T2 – 45 – MHM.

A modo de resumen se presenta en la tabla 4.7 el tipo de falla que se hayo en cada probeta realizada, indicando el modo de falla del conector y lo ocurrido en los materiales.

Tabla 4.7 *Resumen modo de fallas*

Configuración HMH	Modo de falla	Configuración MHM	Modo de falla
C1 - 90°	Deslizamiento	C1 - 90°	Deslizamiento
C2 - 90°	Deslizamiento	C2 - 90°	Deslizamiento
C3 - 90°	Deslizamiento	C3 - 90°	Deslizamiento
C1 - 45°	Corte completo	C1 - 45°	Corte Completo
C2 - 45°	Deslizamiento	C2 - 45°	Deslizamiento
C3 - 45°	Deslizamiento	C3 - 45°	Deslizamiento
T1 - 90°	Corte completo	T1 - 90°	Corte Completo
T2 - 90°	Deslizamiento	T2 - 90°	Deslizamiento
T3 - 90°	Deslizamiento	T3 - 90°	Corte Completo
T1 - 45°	Deslizamiento	T1 - 45°	Deslizamiento
T2 - 45°	Deslizamiento	T2 - 45°	Deslizamiento
T3 - 45°	Deslizamiento	T3 - 45°	Deslizamiento

Se puede concluir que la mayoría de las fallas se deben al deslizamiento de la unión, generado principalmente por el aplastamiento en la madera y la ductilidad del conector. La falla por corte completo del conector se observa mayormente en las conexiones a 90°, ya que estas pueden sobrecargar la interfaz del conector en mayor medida que las conexiones a 45°. Sin embargo, también se han observado comportamientos distintos en algunas configuraciones que presentan ambas fallas, lo cual podría deberse circunstancialmente a la firmeza de la madera alrededor del conector.

Se puede observar que las conexiones que fallaron por corte completo son las que resistieron la mayor carga máxima, excepto en la probeta C1-45°-MHM, que falló a una carga baja en comparación con sus probetas idénticas. Esto podría deberse a un mejor agarre del conector en la madera. Por otra parte, dentro de la categoría de falla por desplazamiento, se destaca que la resistencia al desplazamiento de la unión es superior en las conexiones a 45° debido a un mayor módulo de deslizamiento.

4.7 Conclusión

A partir de los resultados obtenidos y analizados, se puede concluir que los tornillos exhiben una mayor capacidad de carga frente a la acción de la fuerza en comparación con los clavos. Además, las configuraciones inclinadas, es decir, aquellas en las que los clavos y tornillos se encuentran a un ángulo de 45° , muestran una resistencia significativamente mayor en comparación con las configuraciones rectas, esto se debe a la combinación de la resistencia axial del conector, que se manifiesta durante la extracción de este, la resistencia a la flexión que surge debido a la ductilidad de los conectores y del módulo de deslizamiento.

Al cambiar las configuraciones de los conectores de HMH a MHM, varía el área y el material en donde se aplica la carga. Esto conlleva a que las probetas MHM no alcancen la misma resistencia que las configuraciones HMH, debido a las diferentes dimensiones y densidades del elemento central. En las configuraciones MHM, los conectores se sobrecargan en la interfaz únicamente por el corte, sin extracción, lo que resulta en una menor capacidad de corte.

En cuanto a los modos de fallo, se identifican dos escenarios principales. El primero implica el corte total del conector, mientras que el segundo involucra el deslizamiento del conector con una extracción leve de los materiales, lo que eventualmente lleva a la desconexión de los materiales de la estructura. Se concluye que el corte completo ocurre debido al sobreesfuerzo en el conector en la interfaz de la unión sin extracción axial de los conectores, siendo más común en las conexiones a 90° . En contraste, la falla por deslizamiento se debe al aplastamiento de la madera por parte del conector y a la extracción axial del conector, lo que provoca la extracción de una parte del hormigón alrededor del conector.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

5.1 Conclusiones

Basándose en la investigación realizada y en el análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir que:

- Las configuraciones HMH con conectores inclinados en dirección favorable a la carga aplicada exhiben una mayor resistencia al corte en comparación con las configuraciones que utilizan conectores rectos y están ordenadas en MHM. Esto indica que el ángulo de aplicación de los conectores juega un papel significativo en la resistencia al corte. Por otro lado, el tipo de conector en sí no parece tener un impacto considerable en la magnitud de la resistencia al corte, ya que los valores no varían significativamente al cambiar tornillos por clavos dentro de la misma configuración.
- Las configuraciones inclinadas presentan un menor desplazamiento en la interfaz de la unión en comparación con las configuraciones rectas, lo que las hace más efectivas para mantener unidos los elementos estructurales.
- Cuando el conector está a favor de la dirección de la fuerza, como en las configuraciones inclinadas en 45° de HMH, el resultado de la resistencia al corte es superior por las resistencias de flexión y axial que actúan en el conector. En cambio, cuando el conector se encuentra en dirección contraria a la fuerza, como en las configuraciones MHM, se observan resultados de la resistencia al corte menos favorables.

En resumen, se recomienda la configuración de tornillos inclinados debido a su mejor rendimiento frente a cargas, menor desplazamiento y tipos de fallos más favorables. Sin embargo, es importante señalar que se necesitan investigaciones adicionales con diversos materiales y técnicas para evaluar el desempeño de las conexiones híbridas en diferentes

condiciones. Esto plantea desafíos significativos por delante, particularmente en la necesidad de establecer una normativa adecuada para el diseño de conexiones híbridas en estructuras de madera-hormigón.

5.2 Futuras líneas de investigación

Se recomiendan las siguientes futuras líneas de investigación:

- Análisis técnico – económico de un edificio híbrido en comparación a un edificio tradicional:
 - Esta línea de estudio se enfocará en evaluar los aspectos económicos de la sustitución de componentes de concreto armado por madera en edificios. El objetivo es comprender cuantitativamente los cambios en los costos asociados al diseño y la construcción de estas estructuras híbridas.

- Comparación de los rendimientos de la conexión entre distintos tipos de conexiones, mezclados y no, como adhesivos, madera con muescas y conectores mecánicos, con materiales chilenos.

Esta línea de estudio investigará la efectividad de diversas técnicas de conexión, tanto combinadas como individuales, con el propósito de incrementar los módulos de deslizamiento y mejorar la solidez de las uniones. Se hará uso de materiales nacionales para garantizar la pertinencia y aplicabilidad de los resultados en el contexto local.

- Análisis experimental de la influencia de la profundidad del conector en conexiones híbridas entre hormigón y madera.
 - Esta línea de estudio evaluará la profundidad mínima y máxima de inserción de los conectores en diferentes tamaños de vigas y losas. El objetivo es determinar cómo estos parámetros afectan la resistencia al corte, optimizando así el diseño de las uniones híbridas para mejorar su rendimiento estructural.

- Análisis experimental sobre el comportamiento sísmico de uniones mecánicas entre madera y hormigón ante la reversibilidad de las cargas.
 - o Esta línea de estudio evaluará el comportamiento de las uniones híbridas entre madera y hormigón, realizadas con tornillos y clavos, bajo la aplicación de cargas cíclicas y reversibles.

CAPÍTULO 6 REFERENCIAS

- Abdul, M., & Mirdad, H. (2020). *Structural Performance of Mass Timber Panel-Concrete (MTPC) Composite Floor System with Inclined Self-Tapping Screws and an Insulation Layer*.
- Augeard, E., Ferrier, E., & Michel, L. (2020). Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep. *Engineering Structures*, 210, 110289. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.110289>
- Berardinucci, B., Di Nino, S., Gregori, A., & Fragiaco, M. (2017a). Mechanical behavior of timber–concrete connections with inclined screws. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 5(6), 807–820. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N6-807-820>
- Berardinucci, B., Di Nino, S., Gregori, A., & Fragiaco, M. (2017b). Mechanical behavior of timber–concrete connections with inclined screws. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 5(6), 807–820. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N6-807-820>
- Burgos, F., & Ariete, N. A. (2010). *Caracterización de madera de Pinus radiata D. Don sometido a un proceso de modificación térmica usando un ambiente de inmersión*.
- Carvalho, E. P., & Mantilla Carrasco, E. V. (2010). *Influence of test specimen on experimental characterization of timber-concrete composite joints*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.036>
- Ceccotti, A. (2002). Composite concrete-timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 264–275. <https://doi.org/10.1002/pse.126>
- CEN. (2004). *EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*.
- CENAMAD. (2023a). *Losas industrializables de baja huella de carbono*. <https://cenamad.cl/proyecto-de-losas-industrializables-de-baja-huella-de-carbono-cerrara-con-evento-online/>
- CENAMAD. (2023b). *Proyecto de losas industrializables de baja huella de carbono*. <https://cenamad.cl/proyecto-de-losas-industrializables-de-baja-huella-de-carbono-podria-entrar-en-vigor-en-los-proximos-dos-anos/>
- Cetrangolo, G., Cabrera, G., Domenech, L., Godoy, D., Moya, L., Aulet, A., Baño, V., & Bothig, S. (2021). *Informe final publicable de proyecto Compuestos estructurales madera-hormigón a partir de especies de madera de rápido crecimiento*.
- CMPC, M. S. (2020). *PINO RADIATA*. www.cmpcmaderas.com
- Crews, K. I., Gerber, C., Crews, K., Foscoliano, M., & Agus, S. (2010). *Development of Timber Concrete Composite Flooring in Australia and New Zealand*. www.stic.co.nz

- Deam, B. L., Fragiacomio, M., & Buchanan, A. H. (2008). Connections for composite concrete slab and LVL flooring systems. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 41(3), 495–507. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9261-x>
- Dias, A. M. P. G., & Jorge, L. F. C. (2011). The effect of ductile connectors on the behaviour of timber-concrete composite beams. *Engineering Structures*, 33(11), 3033–3042. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.05.014>
- Dias, A. M. P. G., Kuhlmann, U., Kudla, K., Mönch, S., & Dias, A. M. A. (2018). Performance of dowel-type fasteners and notches for hybrid timber structures. *Engineering Structures*, 171, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.057>
- Dias, A. M. P. G., Lopes, S. M. R., Kuilen, J. W. G. Van de, & Cruz, H. M. P. (2007). Load-Carrying Capacity of Timber–Concrete Joints with Dowel-Type Fasteners. *Journal of Structural Engineering*, 133(5), 720–727. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:5\(720\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:5(720))
- Falabella. (2023a). *BOSCH Sierra Circular Gks 20-65 Bosch 2.000w* | *falabella.com*. https://www.falabella.com/falabella-cl/product/114229837/Sierra-Circular-Gks-20-65-Bosch-2.000w/114229838?kid=shopp197fc&disp=1&pid=Google_w2a&gclid=CjwKCAjw5dqgBhBNEi wA7PryaA6ShJI2cHI69bn0mZNRiCpd0ynS95EHbSljvMSILUaJKVdMhTg0TxCfkMQAvD_BwE
- Falabella. (2023b). *GENERICICO X2 Prensas Rápidas Prensa Sargento Prensa Rápida Madera 91cm* | *falabella.com*. https://www.falabella.com/falabella-cl/product/113575780/X2-Prensas-Rápidas-Prensa-Sargento-Prensa-Rápida-Madera-91cm/113575781?kid=shopp150fc&disp=1&pid=Google_w2a&gclid=CjwKCAjw5dqgBhBNEi wA7PryaLag2-_4bjVizdajYDNUFxpXIVIDzs_AN4FJ_so_rlgWiaL00hKsbxOC9IUQAvD_BwE
- Falabella. (2023c). *WURTH Lente Seguridad Policarbonato Gris STD Wurth* | *falabella.com*. <https://www.falabella.com/falabella-cl/product/117048299/Lente-Seguridad-Policarbonato-Gris-STD-Wurth/117048300>
- Frangiaco, M., Gregori, A., Xue, J., Demartino, C., & Toso, M. (2018). Timber-concrete composite bridges: Three case studies. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(6), 429–438. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.09.001>
- Futurebuild. (2020). *TCC Floor Guide New Zealand Edition*. www.futurebuild.co.nz
- Gosselin, A., Blanchet, P., Lehoux, N., & Cimon, Y. (2017). Main Motivations and Barriers for Using Wood in Multi-Story and Non-Residential Construction Projects. *BioResources*, 12(1), 546–570. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.546-570>
- Hairstans, R. (2007). *OPTIMISATION OF TIMBER PLATFORM FRAME CONSTRUCTION*.
- Inchalam. (2022). *Clavos corrientes*.
- Iqbal, A. (2021). Developments in tall wood and hybrid buildings and environmental impacts. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111881>
- Luiz Miotto, J., & Alves Dias, A. (2011). *Glulam-concrete Composites: Experimental Investigation into the Connection System*. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000002>

- Mai, K. Q., Park, A., & Lee, K. (2018). Experimental and numerical performance of shear connections in CLT–concrete composite floor. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 51(4). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1202-3>
- Moshiri, F., Gerber, C., & Crews, K. (2011). *State of the art on Timber Concrete Composite floor*.
- Rodrigues, J. N., Dias, A. M. P. G., & Providência, P. (2013a). Timber-Concrete Composite Bridges: State-of-the-Art Review. In *BioResources* (Vol. 8, Issue 4).
- Rodrigues, J. N., Dias, A. M. P. G., & Providência, P. (2013b). Timber-Concrete Composite Bridges: State-of-the-Art Review. In *BioResources* (Vol. 8, Issue 4).
- Schanack, M., & -Ramos, F. (2010). *Diseño, construcción y ensayo de una estructura de sección mixta madera laminada-hormigón para su uso en puentes*.
- Schänzlin, J., Dietsch, P., & Dias, A. (2018). *Design of timber-concrete composite structures*.
- Shan, B., Xiao, Y., Zhang, W. L., & Liu, B. (2017). Mechanical behavior of connections for glulam-concrete composite beams. *Construction and Building Materials*, 143, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.136>
- Shi, B., Zhu, W., Yang, H., Liu, W., Tao, H., & Ling, Z. (2020). Experimental and theoretical investigation of prefabricated timber-concrete composite beams with and without prestress. *Engineering Structures*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109901>
- Shulman, S., & Loss, C. (2021). *Deconstructable Hybrid Connections for the Next Generation of Prefabricated Mass Timber Buildings*. <https://www.researchgate.net/publication/354793873>
- Siddika, A., Mamun, M. A. Al, Aslani, F., Zhuge, Y., Alyousef, R., & Hajimohammadi, A. (2021). Cross-laminated timber–concrete composite structural floor system: A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105766>
- Sikora, K. S., & Liu, Z. (2018). *SHEAR STRENGTH OF DIFFERENT CONNECTION AND CONCRETE TYPES FOR TIMBER CONCRETE COMPOSITES (TCC)*.
- Sodimac. (2023a). *Guante Multiflex pack 6 pares | Sodimac Chile*. <https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110298355/Guante-Multiflex-pack-6-pares/110298384?exp=sodimac>
- Sodimac. (2023b). *Huincha de medir 8 metros metal | Sodimac Chile*. <https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110036409/Huincha-de-medir-8-metros-metal/110036411?kid=shopp51so&disp=1>
- Sodimac Chile. (2023a). *Clavo Corriente 4"*. https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110276191/Clavo-Corriente-4-,-bolsa-1kg/110276193?exp=sodimac&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAx_GqBhBQEiwAIDNAZn_sLOXSnpPoJCWQdwgK2k3GRcDRjLq4nMmmCxyRLIE7IKxjEQknvxoC6KgQAvD_BwE&kid=shopp383fc
- Sodimac Chile. (2023b). *Tornillo turbo screw 4"*. https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110308479/Tornillo-turbo-screw-4-unidades/110308487?exp=sodimac&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAx_GqBhBQEiwAIDNAZIS6

CHXn_-
rhf0DigJVYJVdbtVJ0vBvca3bsRHoL4fzwYz4jYmmVZhoCy9kQAvD_BwE&kid=shopp383fc

Symons, D., Persaud, R., & Stanislaus, H. (2010). Slip modulus of inclined screws in timber-concrete floors. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 163(4), 245–255. <https://doi.org/10.1680/stbu.2010.163.4.245>

United Nations Environment Programme. (2022). *Global Status Report For Buildings And Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. www.globalabc.org.

Uslar, J. (1939). *El problema de la conservación de las maderas*.

Van der Linden, M. (1999). *Timber concrete composite beams*.

Wacker, J. P., Dias, A. M. P. G., & Hosteng, T. K. (2020). 100-Year Performance of Timber–Concrete Composite Bridges in the United States. *Journal of Bridge Engineering*, 25(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001513](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001513)

Weber. (2020). *Hormigón H-30* (pp. 1–4). www.cl.weber

Yeoh, D., Fragiaco, M., De Franceschi, M., & Heng Boon, K. (2011). State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review. *Journal of Structural Engineering*, 137(10), 1085–1095. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000353](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000353)

CAPÍTULO 7 ANEXOS

7.1 ANEXO 1: Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

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

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

Vinculación

Las conexiones híbridas para elementos de madera hormigón pueden contribuir a varios objetivos de desarrollo sostenible, yo recalco dos de ellas que son las ODS 9 y 11.

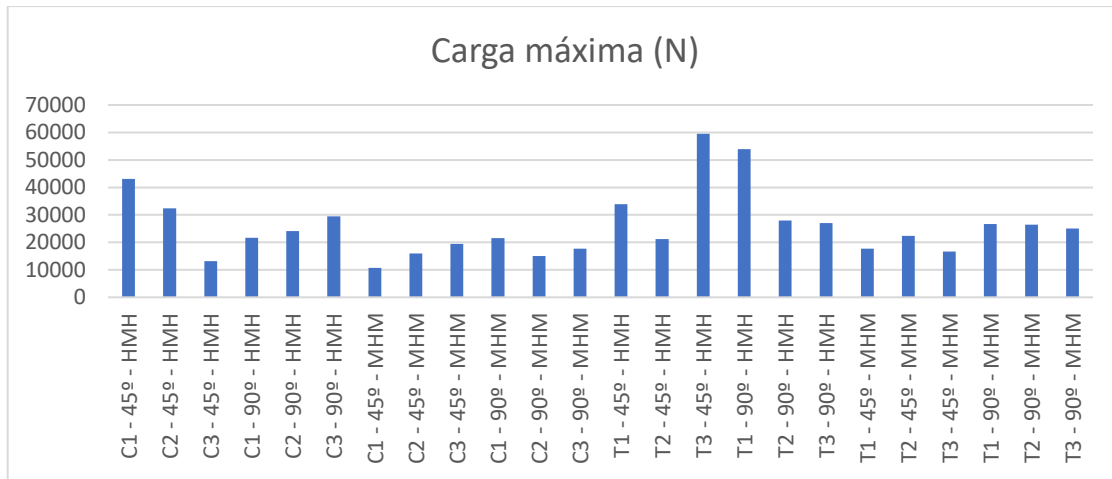
La construcciones híbridas de edificios de mediana o gran altura puede fomentar la innovación en la industria nacional e internacional de la construcción y mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos (ODS 9) y así contribuir a ciudades más sostenibles y resilientes al reducir el impacto ambiental de la construcción y mejorar la calidad de vida de los habitantes. (ODS 11)

7.2 ANEXO 2: Imagen de las tres probetas de la configuración C-45 de HMH.**7.3 ANEXO 3: Imagen de las tres probetas de la configuración T-45 de HMH.****7.4 ANEXO 4: Imagen de las tres probetas de la configuración C-90 de HMH.**

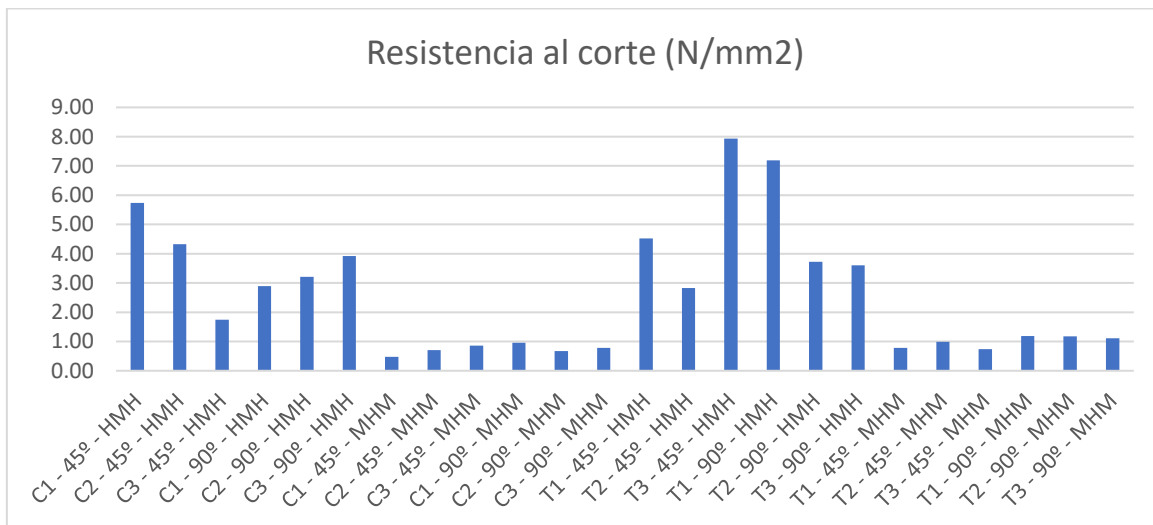
7.5 ANEXO 5: Imagen de las tres probetas de la configuración T-90 de HMH.**7.6 ANEXO 6: Imagen de las tres probetas de la configuración C-45 de MHM.****7.7 ANEXO 7: Imagen de las tres probetas de la configuración T-45 de MHM.**

7.8 ANEXO 8: Imagen de las tres probetas de la configuración C-90 de MHM.**7.9 ANEXO 9: Imagen de las tres probetas de la configuración T-90 de MHM.**

7.10 ANEXO 10: Gráfico de la carga máxima por probeta testada



7.11 ANEXO 11: Gráfico de la resistencia de corte (N/mm²) de las 24 probetas



7.12 ANEXO 12: Tabla de módulos de deslizamiento de los conectores de las 24 probetas

	Probeta	Módulo de desplazamiento K (Kn/mm)	Desplazamiento (mm)
HMH	C1-45	29.10	1.85
	C2-45	12.95	2.08
	C3-45	13.25	5.40
	C1-90	10.32	14.30
	C2-90	12.20	13.23
	C3-90	7.13	14.90
	T1-45	12.91	3.05
	T2-45	21.96	1.90
	T3-45	29.88	2.77
	T1-90	15.09	9.90
	T2-90	13.00	8.20
	T3-90	8.85	9.25
MHM	C1-45	7.79	3.07
	C2-45	6.95	2.13
	C3-45	5.02	4.38
	C1-90	8.23	13.25
	C2-90	4.21	11.95
	C3-90	8.43	12.12
	T1-45	8.72	2.03
	T2-45	4.94	5.52
	T3-45	5.84	3.89
	T1-90	5.89	8.25
	T2-90	10.22	2.53
	T3-90	7.00	3.23

7.13 ANEXO 13: Tabla de cargas máximas, corte y desplazamiento de las 24 probetas

	Configuración	Espécimen	Carga máxima (N)	Corte (N/mm ²)	Corte*A clavo (N)	Desplazamiento (mm)
CLAVOS	HMH	C1 - 45° - HMH	43039.60	5.74	81.41	1.85
		C2 - 45° - HMH	32415.30	4.32	61.31	2.08
		C3 - 45° - HMH	13124.80	1.75	24.83	5.40
		C1 - 90° - HMH	21668.70	2.89	40.99	14.30
		C2 - 90° - HMH	24113.90	3.22	45.61	13.23
		C3 - 90° - HMH	29407.40	3.92	55.62	14.90
	MHM	C1 - 45° - MHM	10726.60	0.48	6.76	3.07
		C2 - 45° - MHM	15914.40	0.71	10.03	2.13
		C3 - 45° - MHM	19446.50	0.86	12.26	4.38
		C1 - 90° - MHM	21593.80	0.96	13.61	13.25
		C2 - 90° - MHM	15065.20	0.67	9.50	11.95
		C3 - 90° - MHM	17714.60	0.79	11.17	12.12
TORNILLOS	HMH	T1 - 45° - HMH	33919.80	4.52	54.58	3.05
		T2 - 45° - HMH	21206.90	2.83	34.13	1.90
		T3 - 45° - HMH	59499.50	7.93	95.74	2.77
		T1 - 90° - HMH	53889.30	7.19	86.72	9.90
		T2 - 90° - HMH	27939.60	3.73	44.96	8.20
		T3 - 90° - HMH	27022.20	3.60	43.48	9.25
	MHM	T1 - 45° - MHM	17653.10	0.78	9.47	2.03
		T2 - 45° - MHM	22407.20	1.00	12.02	5.52
		T3 - 45° - MHM	16629.80	0.74	8.92	3.89
		T1 - 90° - MHM	26725.20	1.19	14.34	8.25
		T2 - 90° - MHM	26404.50	1.17	14.16	2.53
		T3 - 90° - MHM	24985.70	1.11	13.40	3.23

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE TESIS DE MAGISTER**

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil

Carrera : Ingeniería Civil

Nombre del tesista : Pablo Francisco Ochoa Arroyo

Título de la tesis : Investigación experimental de la resistencia al corte en sistemas mixtos de madera y hormigón empleando uniones mecánicas

Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía : Víctor Aguilar Vidal

Profesor(es) Revisor(es) : Dr. Sebastián Calderón, Dra. Cecilia Bustos & Dr. Emilio Dufeu.

Concepto :

Calificación :

Resumen

La investigación se centra en la evaluación de la resistencia al corte de conectores mecánicos, variando el tipo de conector (clavo o tornillo), el ángulo de inserción (45° o 90°) y la disposición de materiales (Hormigón-Madera-Hormigón o Madera-Hormigón-Madera). Se realizaron ocho configuraciones distintas de probetas, que incluyen: tornillos inclinados a 45°, tornillos rectos a 90°, clavos inclinados a 45° y clavos rectos a 90°, todas evaluadas tanto para HMH como para MHM. Para cada configuración se prepararon tres muestras, resultando en un total de 24 especímenes. Estas probetas se confeccionaron en un laboratorio bajo condiciones controladas, utilizando herramientas adecuadas y siguiendo los tiempos necesarios para garantizar la calidad de las probetas híbridas. La resistencia al corte se evaluó utilizando una máquina equipada con sensores que registraron los resultados de carga y desplazamiento, permitiendo así obtener la resistencia al corte y los módulos de deslizamiento para cada configuración. Los resultados concluyen que las configuraciones con conectores inclinados presentan mayor resistencia al corte, los tornillos muestran una mayor resistencia al desplazamiento por unidad de desplazamiento, y las configuraciones HMH son más adecuadas que las MHM. Además, se destaca la importancia de establecer una normativa chilena que respalde el diseño de construcciones híbridas de madera-hormigón, para aprovechar los beneficios de este tipo de estructuras en la industria de la construcción.

