

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA | DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA  
MAGISTER EN REHABILITACIÓN ARQUITECTÓNICA SOSTENIBLE**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA**



# **METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE SOLUCIONES DE REFORZAMIENTO DE UNIONES CARPINTERAS**

**APLICACIÓN EN TIPOLOGÍAS DE UNIONES CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS  
TRADICIONALES DE ENTRAMADO DE MADERA EN VALPARAÍSO, CHILE**

**TESIS DE MAGISTER  
CONSTANZA RACHEL CORNEJO MENA**

**DIRECTORA DE TESIS  
DRA. MARÍA BELÉN JIMÉNEZ RAMÍREZ**

**CO-DIRECTOR DE TESIS  
DR. LUIS PÉREZ POZO**

**2024**





UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA



**Tribunal nombrado por la comisión de profesores del programa de magister de la Universidad Técnica Federico Santa María, al día 22 de agosto de 2024**

**Presidente:**

**Miembro de comisión 1:**

**Miembro de comisión 2:**

**Suplente 1:**

**Suplente 2:**

**El acto de defensa de la tesis se ha realizado el día            de 20            , en las dependencias de la Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso.**

**Calificación:**

**Observaciones:**

**Firma PRESIDENTE**

**Firma MIEMBRO COMISIÓN 1**

**Firma MIEMBRO COMISIÓN 2**



# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me rodean en la vida. Me siento enormemente afortunada de contar con cada uno de ustedes, ya que, de una u otra forma, han sido parte fundamental de este proceso. Gracias por el apoyo, la comprensión y presencia durante este camino.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi profesora guía, Belén Jiménez, y a mi profesor correferente, Luis Pérez, por su inestimable apoyo, paciencia y guía a lo largo de este proyecto. Su experiencia y consejos han sido cruciales para la culminación de este trabajo.

También deseo agradecer profundamente a mis padres, Oriana y Guillermo, por su amor incondicional, su apoyo constante y por creer en mí en todo momento. Su aliento me ha permitido superar los momentos más difíciles durante este proceso universitario.

Quiero dedicar un agradecimiento especial a mi hermano pequeño, Guillermo, por siempre estar a mi lado y apoyarme en todo momento. Tu alegría, compañía y ayuda constante han sido una fuente inagotable de energía y motivación para mí. Gracias por hacer que este camino sea más fácil y por estar para mí en cada paso del proceso. No podría haberlo hecho sin ti.

Finalmente, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a los proyectos que han sido fundamentales para la realización de esta investigación. En primer lugar, al **PROYECTO INTERNO MULTIDISCIPLINARIO INTERNO USM** (Código PI\_M\_2022\_03), “Manufactura y análisis avanzado del comportamiento estructural y sísmico de las uniones carpinteras existentes en edificios tradicionales de entramado de madera en Valparaíso”

Asimismo, agradezco al **PROYECTO INTERNO MULTIDISCIPLINARIO USM 2024-2025** (código PI\_M\_24\_09), “Caracterización y rehabilitación de estructuras tradicionales de entramado de madera en Valparaíso, Chile: Integración de métodos experimentales y fabricación robotizada”



## RESUMEN

Una parte importante del patrimonio construido en el área histórica de la ciudad de Valparaíso (Chile) utiliza la técnica conocida como tabique-adobillo. Estas construcciones se caracterizan por su sistema portante de tabiquería de madera noble rellena con bloques de adobillo, donde las piezas se conectan a través de complejas uniones carpinteras. A pesar de su valor patrimonial, en la actualidad muchas de estas construcciones están experimentando acelerados procesos de deterioro debido a factores como el daño producido por termitas y al daño mecánico ocasionado por el efecto acumulativo de los sismos. Cuando el deterioro de los marcos es irreversible se deben llevar a cabo intervenciones radicales en las estructuras, siendo común el reemplazo de piezas estructurales y el vaciado de los bloques de adobillos para facilitar su reparación. En este tipo de estructuras las uniones son las áreas más críticas al ser las principales áreas de disipación de energía, lo que las vuelve más propensas a sufrir daños por sobrecargas. Reforzar las uniones permite recuperar y mejorar la capacidad estructural de los edificios de entramado, incrementando su estabilidad y seguridad, para así, evitar el desmantelamiento de las obras originales.

Esta investigación propone una metodología semicuantitativa, para abordar el diseño y prototipado de soluciones de reforzamiento para las uniones carpinteras, alineadas con los principios modernos de la rehabilitación, integrando soluciones removibles, mínimas y sostenibles. La metodología propuesta busca guiar el desarrollo de soluciones efectivas, que sean removibles, mínimas y sostenibles, alineadas con los principios modernos de rehabilitación, y se divide en dos partes. La primera integra métodos cualitativos y cuantitativos para la resolución de problemas de inventiva para analizar las necesidades específicas de cada tipo de unión. En esta etapa se ejecuta un análisis comparativo y cuantitativo, integrando aproximaciones como el diagrama de caja, comparación de pares y la resolución de contradicciones TRIZ, donde se evalúan diferentes técnicas de reforzamiento existentes en la literatura, en contraste con las necesidades específicas de la unión que se desea reforzar para buscar las opciones que mejor se ajusten a sus requerimientos específicos.

La segunda etapa se enfoca en el diseño y prototipado definitivo del reforzamiento en la unión. En este caso, la metodología se aplica para el estudio y reforzamiento del ensamble tipo caja y espiga, una unión característica de los edificios tipo tabique-adobillo de Valparaíso, resultando en dos propuestas de refuerzo. Ambas integran un sistema de placas conectadas por un cable tensor de acero, variando su disposición en las caras frontales y laterales de la unión. Finalmente, se establece el diseño de un programa experimental para verificar la efectividad de las soluciones mediante la aplicación de una carga axial pre-comprimida, que simula el efecto del peso propio y la sobrecarga de uso de la pieza, y de cargas laterales que simulan la fuerza sísmica a la que podría estar sometida la unión en condiciones de servicio en una estructura real.



## ABSTRACT

An important part of the built heritage in the historic area of the city of Valparaíso (Chile) uses the technique known as “tabique-adobillo”. These constructions are characterized by their load-bearing system of hardwood partition walls filled with adobillo blocks, where the pieces are connected through complex carpenter joints. Despite their heritage value, many of these buildings are currently undergoing accelerated deterioration processes due to factors such as termite damage and mechanical damage caused by the cumulative effect of earthquakes. When the deterioration of the frames is irreversible, radical interventions must be carried out on the structures, being common the replacement of structural pieces and the emptying of the adobe blocks to facilitate their repair. In this type of structures, the joints are the most critical areas as they are the main areas of energy dissipation, which makes them more prone to suffer damage due to overloads. Reinforcing the joints allows recovering and improving the structural capacity of the framed buildings, increasing their stability and safety, thus avoiding the dismantling of the original works.

This research proposes a semi-quantitative methodology to address the design and prototyping of strengthening solutions for carpentry joints, aligned with modern rehabilitation principles, integrating removable, minimal and sustainable solutions. The proposed methodology seeks to guide the development of effective solutions that are removable, minimal and sustainable, aligned with modern rehabilitation principles, and is divided into two parts. The first integrates qualitative and quantitative methods for inventive problem solving to analyze the specific needs of each type of joint. In this stage, a comparative and quantitative analysis is performed, integrating approaches such as box plot, pairwise comparison and TRIZ contradiction resolution, where different strengthening techniques existing in the literature are evaluated in contrast with the specific needs of the joint to be strengthened in order to find the options that best fit its specific requirements.

The second stage focuses on the design and definitive prototyping of the joint reinforcement. In this case, the methodology is applied to the study and reinforcement of the box-and-tenon assembly, a characteristic joint of the partition-anvil type buildings in Valparaíso, resulting in two reinforcement proposals. Both integrate a system of plates connected by a steel tensioning cable, varying their arrangement on the front and lateral faces of the joint. Finally, the design of an experimental program is established to verify the effectiveness of the solutions through the application of a pre-compressed axial load, which simulates the effect of self-weight and the overload of use of the piece, and lateral loads that simulate the seismic force to which the joint could be subjected under service conditions in a real structure.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>I.</b>	<b>AGRADECIMIENTOS</b>	5
	RESUMEN	7
	ABSTRACT	9
<b>II.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	
	Presentación del tema	15
	Antecedentes y motivación	18
	Hipótesis	19
	Objetivos	19
	Alcances de la investigación	20
	Metodología	21
<b>III.</b>	<b>ESTRUCTURA DE LA TESIS</b>	
	<b>CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE</b>	
1.1	Sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera	25
1.1.1	Tipologías constructivas en Chile y el mundo	25
1.1.2	Comportamiento estructural y sísmico	27
1.1.3	Ductilidad y disipación de energía	28
1.1.4	Daños sísmicos en los sistemas constructivos tradicionales post-terremoto	29
1.2	Las uniones carpinteras: tipologías y rol estructural	32
1.2.1	Ensamblés	33
1.2.2	Empalmes	34
1.2.3	Acoplamientos	35
1.2.4	Uniones encoladas	35
1.2.5	Comportamiento estructural y sísmico de las uniones carpinteras	36
1.3	Principales causas de deterioro de las estructuras de madera	39
1.3.1	Agentes abióticos o fisicoquímicos	40
1.3.2	Humedad atmosférica	40
1.3.3	Fuego	41
1.3.4	Daño mecánico	41
1.3.5	Agentes bióticos o biológicos	43
1.4	Soluciones de reforzamiento de uniones carpintera: revisiones técnicas tradicionales de vanguardia	46
1.4.1	Aproximaciones experimentales para el prototipado de soluciones de reforzamiento	48
1.4.2	Reforzamiento con elementos metálicos y técnicas tradicionales	48
1.4.3	Reforzamientos con amortiguadores	52
1.4.4	Reforzamientos con polímeros reforzados	54
1.4.5	Reforzamientos con soluciones materiales innovadoras: placas de bambú y elementos de aleación con memoria de Forma (shape-memory alloy)	56
1.5	Métodos de diseño para resolver problemas de inventiva	58

## **CAPÍTULO 2: SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE ENTRAMADO DE MADERA EN VALPARAÍSO**

2.1	Contexto histórico: origen y configuración urbana	63
2.1.1	Traza urbana, demografía y arquitectura foránea	64
2.2	Configuración del sistema constructivo	68
2.2.1	Fundaciones	68
2.2.2	Entrepisos	69
2.2.3	Muros	70
2.2.4	Uniones carpinteras	71

## **CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIONES CARPINTERAS TRADICIONALES DE LOS ENTRAMADO DE MADERA DE VALPARAÍSO: CASOS DE ESTUDIO**

3.1	Metodología	75
3.1.1	Estudio de casos y ficha de recopilación de datos	76
3.1.2	Casos de estudio	80
3.1.3	Ensamble Caja y Espiga	81
3.1.4	Rol dentro del marco y el comportamiento estructural	83
3.1.5	Ensamble Embarbillado o de espera	84
3.1.6	Rol dentro del marco y el comportamiento estructural	84
3.1.7	Ensamble Cola de milano	85
3.1.8	Rol dentro del marco y el comportamiento estructural	86
3.1.9	Uniones por contacto	87
3.2	Estado de conservación: patologías y lesiones características de los marcos y las uniones	88
3.2.1	Ataque por xilófagos	88
3.2.2	Daños por humedad	89
3.2.3	Daño mecánico	90
3.2.4	Mantenimiento de los marcos y las uniones tradicionales	90

## **CAPÍTULO 4: PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DE SOLUCIONES DE REFORZAMIENTO PARA UNIONES CARPINTERAS**

4.1	Marco teórico	95
4.2	Metodología para el diseño de soluciones de reforzamiento para uniones carpinteras	96
4.2.1	Definición de la problemática	99
4.2.2	Comparación de pares	102
4.2.3	Método de caja	104
4.2.4	Evaluación comparativa	105
4.2.5	Lista de requerimientos	108
4.2.6	Desliegue de la función de calidad	109
4.2.7	Resolución de contradicciones con la metodología TRIZ	112
4.2.8	Carta morfológica	114
4.3	Generación de conceptos para el diseño conceptual de las soluciones de reforzamientos de las uniones carpinteras	116
4.3.1	Resultados	116

## **CAPÍTULO 5: PROTOTIPADO DE REFORZAMIENTO PARA EL ENSAMBLE CAJA Y ESPIGA**

5.1	Caracterización de la propuesta de reforzamiento: variables, materialidad, geometría y especificaciones técnicas	126
5.1.1	Iteración de diseño de refuerzo para la union Caja y Espiga	130
5.1.2	Estudio analítico para el diseño estructural del refuerzo	134
5.1.3	Especificaciones técnicas	

## **CAPÍTULO 6: PROTOTIPADO Y PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA VERIFICAR EL COMPORTAMIENTO DE LAS SOLUCIONES DE REFORZAMIENTO**

6.1	Construcción de los modelos	144
6.1.1	Mecanizado robótico	145
6.1.2	Montaje de los sistemas de reforzamiento	147
6.2	Ensayos de carga lateral para la validación de los prototipos	150
6.2.1	Descripción de los ensayos	150
6.2.2	Matriz de ensayo	151
6.2.3	Configuración del ensayo	152

### **III. CONCLUSIONES**

	Resumen del trabajo	155
	Metodología propuesta	157
	Resultados	158
	Discusión	159
	Conclusiones y comentarios finales	160
	Principales contribuciones	161
	Trabajo futuro	162

### **IV. REFERENCIAS**

	Referencias bibliográficas	165
--	----------------------------	-----

### **V. ANEXOS**

	Anexo 1	177
	Anexo 2	179
	Anexo 3	181
	Anexo 4	187
	Anexo 5	194
	Anexo 6	199
	Anexo 7	204



# INTRODUCCIÓN

## PRESENTACIÓN DEL TEMA

Los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera son reconocidos por su carácter sismorresistente en el ámbito de la construcción, siendo altamente valorados y reconocidos en regiones propensas a terremotos como China (Zhao et al., 2019), Japón, Nueva Zelanda, Estados Unidos (FSC España, 2018), Portugal (Poletti, 2013), Perú (Torrealva et al., 2018) y Chile (Jiménez & Pelà, 2023). Dhandapany & Menon (2019) argumentan que este tipo de estructuras han sido comúnmente desarrolladas y promovidas luego de producirse importantes terremotos o por la cultura sísmica de los territorios. No obstante, a pesar de su carácter antisísmico, es común que las estructuras pierdan atributos de resistencia y rigidez, debido a la degradación del material y consecuente pérdida de las condiciones mecánicas iniciales de los elementos constructivos, dejando a las estructuras en un escenario incierto de desempeño sísmico (Gentile et al., 2002; Manetti, 2020).

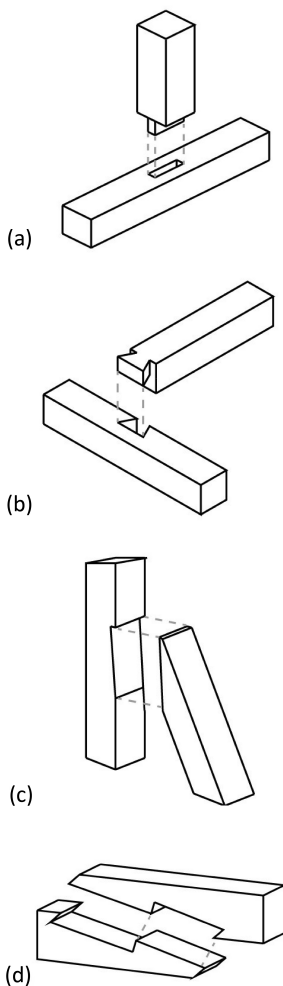


Fig. 1  
Diagrama uniones carpinteras: (a) ensamblaje caja y espiga; (b) ensamblaje cola de milano; (c) ensamblaje embarbillado frontal; (d) empalme rayo de júpiter.

Las uniones carpinteras son el método tradicional de anclaje utilizado en inmuebles históricos de entramado de madera. Estas son las encargadas de transmitir las cargas por contacto directo entre los elementos que conforman el sistema estructural y desempeñan un papel importante en el comportamiento estructural de las edificaciones, permitiendo mantener y asegurar la integridad del armazón durante un sismo (Branco & Descamps, 2015). No obstante, esta característica también las convierte en puntos críticos dentro de la estructura, ya que, al ser las principales zonas de disipación de energía durante un sismo, pueden ser las primeras en fallar.

A pesar de que se han llevado a cabo numerosas investigaciones para evidenciar el comportamiento estructural y sísmico de diferentes tipos de uniones carpinteras mediante aproximaciones experimentales y numéricas, todavía existe incertidumbre sobre las formas de colapso de algunas tipologías (Shiratori et al., 2008). Además, la alta variabilidad formal de los marcos y las uniones convierte a cada ejemplar un caso singular de análisis, existiendo un sinnúmero de posibilidades de respuesta en estas tipologías (ver Figura 1), dependiendo de sus características geométricas, material y estado de conservación, entre otras. Por otro lado, autores como Parisi & Piazza (2000) sostienen que, con frecuencia, la rehabilitación de inmuebles históricos requiere la readaptación de las conexiones tradicionales de madera debido al daño que puede producirse en las mismas. En consecuencia, el refuerzo se plantea como una solución idónea para evitar la pérdida de la capacidad de la unión y la posible separación de las superficies de contacto.

Generalmente, las investigaciones en torno al estudio del reacondicionamiento de uniones carpinteras utilizan soluciones de refuerzo que parecen

replicar las antiguas técnicas de reforzamiento, incluso cuando se incorporan nuevas formas de fijación, como tornillos y tornillos autorroscante (Branco & Descamps, 2015). No obstante, investigaciones más recientes (Cardone et al., 2019; Dai et al., 2022; Xue et al., 2020, 2021a; Yu et al., 2022) han explorado en el uso de materialidades y dispositivos más novedosos, como lo son los amortiguadores y las aleaciones con memoria de forma (shape memory alloy), respectivamente. A pesar de estos valorables esfuerzos, muchas de estas investigaciones no consideran los principios de la conservación de las estructuras de madera establecidos por el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS) (ICOMOS, 1999), que promueven trabajar en estrategias de intervención que sean removibles, mínimas y sostenibles. Esta situación conlleva a que muchas veces no se respete el valor cultural, diseño arquitectónico y estructural de los inmuebles históricos.

Durante las últimas dos décadas han aumentado la cantidad de investigaciones relacionadas al reforzamiento de las uniones carpinteras para diferentes tipos de juntas. En este contexto, las investigaciones teórico-experimentales han sido las más utilizadas por diversos autores (Li et al., 2021; Shiratori et al., 2008; Tannert, 2016; Wu et al., 2019; Xie et al., 2019; Xue et al., 2020, 2021; Yu et al., 2022; Zhao et al., 2019; Zhou & Yan, 2015). Este tipo de enfoque consiste en ejecutar ensayos, generalmente de carga vertical o lateral, en las uniones carpinteras sin refuerzo para conocer su comportamiento característicos, permitiendo evaluar aspectos como la capacidad de carga, rigidez y mecanismos de colapso (Guindos, 2019). A través del análisis de estos datos, se proponen soluciones para el reforzamiento de la unión que se vuelve a ensayar para luego comparar los resultados entre ambos modelos, con y sin refuerzo, y verificar su eficacia.

Si bien los enfoques experimentales para el diseño de soluciones de reforzamiento de uniones carpinteras suelen resultar en soluciones adecuadas, estos requieren de un importante despliegue de recursos muy específicos, tales como disponer de equipamiento propio de un laboratorio de ensaye de materiales, de investigadores especialistas en ingeniería estructural, técnicos de laboratorio, además de tiempo. Esto lo convierte en un método preciso pero muy exclusivo, que muchas veces es inaplicable en la práctica. Por otro lado, estas aproximaciones no suelen incorporar procesos para la resolución de problemas de inventiva o diseño, lo que lleva a la replicación técnicas ya existentes con ligeras variaciones, sin interpretar de manera analítica las necesidades específicas de la unión a intervenir.

Considerando lo anterior, la presente investigación propone una alternativa para abordar el diseño de soluciones de reforzamiento estructural para uniones carpinteras en edificios históricos, a través de una metodología que incorpora aproximaciones cualitativas y semicuantitativas para la resolución de problemas de inventiva y análisis de las necesidades particulares para cada tipo de unión.

La metodología propuesta incluye una fase de estudio centrada en la caracterización de las uniones carpinteras y definición de la problemática de diseño, reconociendo las particularidades morfológicas y rol estructural de la unión. Además, aborda la definición de las necesidades específicas que debe cumplir el reforzamiento, y estudio de mercado que incluye el análisis de las diferentes soluciones que existen para resolver problemáticas similares en la actualidad, generando un abanico de posibilidades y soluciones. Este método permite visualizar una serie de pasos integrados en una sola matriz y analizar de manera global cada aspecto de la investigación. También propone el análisis de contradicciones que puedan surgir dentro de las propias necesidades del diseño reforzamiento a través de una matriz de resolución de problemas de

inventiva, que busca que se potencien las características del diseño a través de soluciones innovadoras.

La metodología se aplicó para abordar el prototipado de soluciones de reforzamiento para tres tipos de uniones carpinteras, los ensambles de tipo caja y espiga, el embarbillado frontal o ensamble de espera y el de cola de milano. Todas estas uniones son características de los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera de la ciudad de Valparaíso, Chile, una técnica que también se conoce como “tabique-adobillo” y que forja construcciones que representan una parte importante del patrimonio construido de la ciudad que fue declarada Sitio Patrimonio Mundial por la UNESCO en 2003. En este contexto, el ensamble caja y espiga fue una técnica clásica de ensamblaje e imperante en la carpintería de armar utilizada en muebles históricos de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso. Se trata de un ejemplar simple que no requiere elementos auxiliares, el cual se utiliza para resolver la conexión entre dos elementos perpendiculares, usualmente, una viga y una columna.

A pesar del alto valor histórico y arquitectónico de las construcciones de entramado de madera de Valparaíso, en la actualidad muchas de ellas presentan altos niveles de deterioro, debido, en parte, a amenazas de origen antrópico y natural, como pueden ser los sismos, incendios, plagas de xilófagos, entre otras. Por otro lado, la falta de mantenimiento periódico, el desuso de los inmuebles, su antigüedad, y la nula prevención ante la exposición a daños estructurales, desencadenan y empeoran los procesos de degradación de las construcciones, y a su vez han gatillado alarmantes procesos de deterioro y obsolescencia de este tipo de construcciones en la ciudad (Carrasco et al., 2018; González, 2008; Kapstein, 2018).

## ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

Los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera relleno con adobillo, conocidos como “tabique-adobillo” (Figura 2), son parte de un legado arquitectónico y constructivo de la ciudad de Valparaíso, que actualmente se ve amenazado por el desarrollo urbano contemporáneo. Aunque en los últimos años se han llevado a cabo diversos estudios en la ciudad de Valparaíso sobre la configuración arquitectónica, estructural y del estado de conservación de estos inmuebles (Bustos, 2023; Carrasco et al., 2018; Dávila & Contreras, 2022; González & Maino, 2019; R. González, 2008; Jiménez, 2014; Kapstein, 2018; Sánchez & Jiménez, 2011) existen escasos estudios que propongan soluciones sostenibles para el reforzamiento de las estructuras y sus uniones carpinteras. Jorquera (2014) señala que existe un importante deterioro arquitectónico-urbano y una poca valorización de la cultura constructiva en la ciudad de Valparaíso.

El daño que presentan actualmente las estructuras tradicionales de entramados de madera en la ciudad en muchas ocasiones el daño es irreversible, conduciendo a la pérdida de piezas estructurales que deben ser reemplazadas, o al vaciamiento de las estructuras de entramado de madera que están comúnmente rellenas de ladrillos de adobillos. De acuerdo con (Poletti, 2013), el relleno aporta rigidez a los marcos, y dejarlos desprovistos de él conllevaría a que sufrieran mayores deformaciones en caso de sismo, relegando la estabilidad de la estructura principalmente a las uniones carpinteras que podrían verse sobre exigidas.

De acuerdo con Bustos (2023), es importante reconocer que la falta de conocimiento e información sobre los sistemas constructivos tradicionales, junto a los escasos financiamientos para intervenir estructuras históricas, lo que resulta el manejo inapropiado de los inmuebles, existiendo intervenciones invasivas que no responden a las verdaderas necesidades de los inmuebles. Por otro lado, los organismos encargados de la protección del patrimonio mundial, cultural y natural señalan con firmeza que “el deterioro o la desaparición de un bien del patrimonio cultural y natural constituye un empobrecimiento nefasto del patrimonio de todos los pueblos del mundo” (UNESCO, 1972). En esta misión de preservar el legado cultural, las palabras de Rojas (1999) resuenan como una llamada de acción. La preservación de nuestros centros históricos no solo guarda la historia y la memoria de nuestras naciones, sino que también ofrece la oportunidad de revitalizar y dar un nuevo propósito a estas estructuras estratégicamente ubicadas para el uso contemporáneo (Rojas, 1999). En este contexto el emprender esta investigación en busca de soluciones de reforzamiento para inmuebles de entramado de madera significa un paso para la preservación y revitalización del patrimonio cultural



Fig. 2  
Fotografías del sistema constructivo tradicional de entramado de madera relleno con adobillo: (a) entramado de muro; (b) ensamble caja y espiga.

inmueble, sobre todo en temas tan importantes a nivel país como lo son la protección de las estructuras en situaciones de sismos o terremotos.

## **HIPÓTESIS**

El diseño de soluciones para el reforzamiento de uniones carpinteras está intrínsecamente vinculado con el rol que desempeña la unión en la estructura y a su comportamiento característico. El desarrollo de una metodología que combine aproximaciones teóricas cualitativas y semicuantitativas para la resolución de problemas de inventiva permitirá explorar y prototipar soluciones adecuadas para el reforzamiento de las uniones carpinteras existentes en edificios históricos, en línea con los principios modernos de la conservación, implementando técnicas innovadoras.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo principal**

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar de una metodología semicuantitativa para diseñar soluciones para el reforzamiento de uniones carpinteras existentes en sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar los sistemas de entramado de madera con un enfoque en sus uniones carpinteras.
- Evaluar el estado de conservación de las uniones carpinteras en estructuras de entramado de madera en Valparaíso y detectar las principales causas de su deterioro.
- Comparar y analizar los diferentes estudios publicados sobre soluciones para el reforzamiento de las uniones carpinteras.
- Diseñar y prototipar soluciones de refuerzo con el objetivo de incrementar la capacidad estructural y de carga lateral de las uniones carpinteras y evitar la separación de las piezas.
- Proponer un diseño experimental para la validación de las soluciones de reforzamiento

## ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Los alcances de esta investigación se circunscriben al desarrollo de una metodología para el diseño y prototipado de soluciones de reforzamiento estructural para uniones carpinteras existentes en estructuras tradicionales de entramado de madera. La metodología de carácter mixto, que incluye aproximaciones para el análisis cualitativo y semicuantitativo, involucra la aplicación de marcos teóricos para la resolución de problemas de inventiva para abordar el diseño de las propuestas.

La metodología propuesta se utilizó para desarrollar soluciones de reforzamiento para tres tipos de uniones carpinteras: embarbillado frontal o ensamble de espera, cola de milano y caja y espiga. Estas uniones son características de los sistemas constructivos de entramado de madera existentes en la ciudad de Valparaíso, Chile, que se define como caso de estudio. Las propuestas para las tres uniones fueron desarrolladas de forma conceptual; sin embargo, una fase posterior de la investigación involucra el prototipado de una de las soluciones planteadas, para la unión caja y espiga, que es la unión más común del sistema constructivo. Por último, este trabajo propone un diseño experimental para la validación de la propuesta estudiada, integrando la configuración de ensayos de carga lateral cíclicos y monotónico del modelo de la unión caja y espiga con y sin refuerzos.

Esta investigación fue desarrollada dentro del marco del proyecto Interno de Investigación Multidisciplinario USM titulado 2022 “Manufactura y análisis avanzado del comportamiento estructural y sísmico de las uniones carpinteras existentes en edificios tradicionales de entramado de madera en Valparaíso” (código PI\_M\_2022\_03) y financiado por la Dirección General de Investigación, Innovación y Emprendimiento de la USM. El proyecto es dirigido por académicos de los departamentos de Arquitectura, Ingeniería Civil Mecánica y Obras Civiles de la misma casa de estudios.

## METODOLOGÍA

La metodología y flujo de trabajo propuesto para alcanzar los objetivos de la presente investigación se divide en las siguientes 6 etapas:

### Etapa 1. Revisión bibliográfica

La primera etapa de esta metodología involucra una revisión exhaustiva de la bibliografía publicada con el objetivo de establecer el estado del conocimiento respecto a las aproximaciones de diseño que se utilizan para reforzar las uniones carpinteras en las construcciones históricas de entramado de madera, tanto en el contexto nacional como internacional. Asimismo, se busca reconocer y estudiar diferentes soluciones de reforzamiento. La búsqueda de información se centró en fuentes primarias y secundarias, específicamente en libros, artículos científicos, tesis, cartografías, planimetrías, y casos análogos, entre otros. Además, esta etapa considera la recopilación de antecedentes generales del caso de estudio, los edificios de entramado de madera de la ciudad de Valparaíso (Chile), considerando datos relevantes del contexto, sistema constructivo y uniones carpinteras. El objetivo es dilucidar aspectos como la configuración geométrica característica de las uniones, especies madereras y principales agentes del daño.

### Etapa 2. Elaboración de fichas de recopilación de datos

La segunda etapa consiste en la elaboración de fichas para la recopilación de datos de edificaciones de entramado de madera que datan entre medidas del siglo XIX y principios del siglo XX. Esta ficha se divide en siete secciones, que van desde una revisión general de antecedentes del inmueble, la identificación del sistema constructivo y sus revestimientos, seguido por un análisis del estado de conservación de las uniones carpinteras, con un enfoque en los ensambles caja y espiga, embarbillado y cola de milano. La ficha propuesta se describe en detalle en la Sección 4.1.1. “Estudio de casos y ficha de recopilación de datos”.

### Etapa 3. Estudio de casos

La tercera etapa de esta investigación considera el estudio de casos a través del levantamiento y análisis de información con la ficha descrita en la Etapa 2, datos que serán complementados con observaciones desde inspecciones in situ. Los casos de estudio serán seleccionados de acuerdo con los siguientes criterios:

- Pertenecer a la Zonas Típicas o en de Conservación Histórica de la ciudad de Valparaíso. En esta fase se realiza una delimitación de la zona de búsqueda.
- Se recomienda seleccionar como casos de estudio edificios que estén siendo intervenidos al momento de la inspección con el objetivo permitir la observación directa de los marcos de madera y sus uniones sin revestimientos.

Para la adquisición de datos, además de completar la ficha, se consideran levantamientos fotográficos, geométricos y técnicos, que se obtendrán a través de la medición y observación in situ de las tipologías de uniones carpinteras y patologías o lesiones características de las mismas.

#### **Etapa 4. Formulación de metodología para el diseño de soluciones de reforzamiento de uniones carpinteras a través de la resolución de problemas de inventiva**

La cuarta etapa consiste en la formulación de una metodología para el diseño de soluciones para el reforzamiento estructural de las uniones carpinteras. Esta etapa considera el análisis preliminar de diferentes metodologías que abordan el diseño de productos a través de diversas estrategias la resolución de problemas de inventiva, con el fin de proponer soluciones innovadoras y optimizar recursos y tiempo, y que se basan en la propuesta de Morris Asimow (Asimow, 1962), denominada “morfología del diseño”.

En la propuesta metodológica de este trabajo se adopta el método de Asimow (1962) para definir la problemática, destacando las características específicas de las uniones carpinteras bajo estudio, así como los objetivos, restricciones y la función que debe cumplir el refuerzo. Posteriormente, se integra la herramienta conocida como el Método de Comparación de Pares (Saaty, 1990), con el objetivo de analizar cuantitativamente las necesidades del refuerzo, y el método de diseño del Diagrama de Caja Negra y Transparente (Jones, 1970), para el análisis de las condiciones que afectaran las uniones carpinteras y la reacción de estas mismas ante cargas laterales. Por otro lado, se desarrolla una evaluación comparativa de las diferentes soluciones de refuerzo planteadas por otros autores, con el objetivo de generar una analizar e identificar fortalezas y debilidades de estas, seguido por una lista de requerimientos con parámetros cualitativos y cuantitativos asociados a las necesidades de la unión y del refuerzo.

A continuación, la metodología incorpora un análisis de las necesidades y expectativas del diseño, implementando la metodología conocida como Despliegue de la Función de Calidad (o Quality Function Deployment QFD), inventada por Yoji Akao y Shigeru Mizuno en la década del 1960 (Tamayo & Bosch, 2004). Esta herramienta utiliza una matriz de comparación de datos que permite determinar contradicciones que surgen en el diseño, así como crear productos que se adapten a los gustos y necesidades del usuario. Para resolver las contradicciones que pueden surgir en el diseño del refuerzo, se incorpora la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas del método TRIZ (Teoría para Resolver Problemas de Inventiva), desarrollada por Genrich Altshuller (2002) en la década de 1940, que ofrece soluciones genéricas de diseño para resolver las contradicciones detectadas.

Finalmente, se elabora una carta morfológica que representa las características de las soluciones de refuerzo analizadas en los pasos previos. Esta carta genera un abanico de posibilidades en cuanto a la morfología y materialidad para el refuerzo en cuestión.

En resumen, la metodología propuesta en este trabajo se compone de nueve pasos, que incluyen: (1) la definición de la problemática; (2) comparación de pares; (3) diagrama de caja; (4) evaluación comparativa; (5) lista de requerimientos; (6) despliegue de la función de calidad; (7) carta morfológica, (8) resolución de contradicciones con TRIZ y; (9) creación de conceptos. En este trabajo la aplicación de esta metodología resulta en tres ideas de conceptos como unas soluciones iniciales de refuerzo, adaptadas a las diferentes uniones carpinteras investigadas.

### **Etapa 5. Prototipado del refuerzo**

La quinta etapa de esta metodología considera el prototipado de una de las soluciones de reforzamientos resultante en la Etapa 4 desde los conceptos de diseño obtenidos al aplicar la metodología. En particular, se considera el desarrollo del reforzamiento en la unión caja y espiga al ser la unión más utilizada en el sistema constructivo estudiado en esta investigación. Esta fase implica la resolución técnica y constructiva del diseño, considerando las necesidades específicas de la unión tal como la geometría, solicitaciones estructurales, y materialidad del refuerzo, entre otros. Para ello, se considera ejecutar iteraciones desde los conceptos de diseño, considerando parámetros relacionados con la morfología, el tamaño y la posición de los elementos. También se considera ejecutar un estudio analítico del funcionamiento de la propuesta y una correcta selección de elementos según las especificaciones técnicas de las marcas disponibles y las necesidades específicas del refuerzo. La última etapa considera la construcción del refuerzo e instalación en la unión.

### **Etapa 6. Elaboración de un diseño experimental para la validación del prototipo ante cargas laterales y axiales**

La última etapa considera el diseño de una campaña experimental para la validación de la propuesta prototipada en la Etapa 5. En particular, se detallan los procedimientos que se deben llevar a cabo para ensayar los modelos de una de las uniones, con y sin refuerzo, ante cargas laterales y axiales en un laboratorio de ensaye de materiales, delineando la programación de los ensayos incluyendo detalles como las condiciones de carga y contorno, tipo de ensayos, disposición de las herramientas de medición en las probetas, métodos de aplicación de la carga etc. El objetivo de esta propuesta es comparar, en un futuro próximo, los resultados experimentales de las probetas con y sin refuerzos, con el fin de determinar la contribución en términos de resistencia, rigidez, comportamiento característico y modos de fallo de la solución propuesta en la unión.

Cabe mencionar que esta investigación tiene continuidad gracias al desarrollo del proyecto multidisciplinario titulado “Caracterización y rehabilitación de estructuras tradicionales de entramado de madera en Valparaíso, Chile: Integración de métodos experimentales y fabricación robotizada” (código PI\_M\_24\_09) financiado por la Dirección General de Investigación, Innovación y Emprendimiento de la Universidad Técnica Federico Santa María (USM) y liderado por académicos de los departamentos de Arquitectura, Obras Civiles y Mecánica.



# CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE

## 1.1 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE ENTRAMADO DE MADERA

La historia de la construcción evidencia que los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera han sido utilizados desde hace siglos en diferentes lugares alrededor del mundo, especialmente en países de Asia y Europa. Estas técnicas y conocimientos posteriormente migraron a la América colonial, donde tuvieron un importante auge y difusión. Según explica Guindos (2019), la madera es el primer material de construcción utilizado de madera masiva, y su uso se registra desde la época neolítica, alrededor del año 9.000 A.C., para la construcción de cabañas en el borde de Turquía e Irán. Además, Guindos (2019) añade que, en la época antigua, aproximadamente en el año 3.000 A.C., la cubierta de las tumbas reales de la dinastía egipcia fue construidas de madera; a partir de este descubrimiento, se han reportado múltiples usos de madera en la cultura egipcia. Por otra parte, según Guindos (2019) la madera fue el material predominante en la construcción en gran parte de Europa desde la edad media hasta el renacimiento. En esta región se desarrollaron muchas de las soluciones constructivas que resultaron fundamentales para los sistemas modernos de construcción.

### 1.1.1 TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN CHILE Y EL MUNDO

El sistema constructivo conocido como la cabaña de madera de troncos apilados o log-cabin construction, según expone Cascajares & Crespo (2015), fue una de las técnicas constructivas mayormente difundidas en Norteamérica, cuyo uso se remonta a la época de los primeros colonos ingleses, escandinavos y alemanes. A mediados del siglo XVII, fue exportado a Norteamérica, y según expone Guindos (2019), se considera la precursora de las construcciones resistente al corte. Además, es una técnica fundamental para el desarrollo de ciertas uniones carpinteras debido a los rebajes utilizados para el calce de los elementos de madera (Guindos 2019).



Fig. 3  
Sistema constructivo log-cabin construction (Cascajares & Crespo, 2015).

La técnica del log-cabin se basa en un sistema de muros verticales realizados a partir de troncos, con la longitud de la fachada, apilados y dispuestos en horizontal (ver Figura 3). Este sistema utiliza tres tipos de conexión en esquina: la primera, involucra uno o dos rebajes en el extremo

de la madera para el ensamble entre elementos. La segunda, usa troncos redondos con una conexión tipo cuña generada mediante un labrado en forma de prima trapezoidal en los extremos. La tercera, consiste en una pieza vertical o glisser con acanaladuras longitudinales donde se encajan los troncos horizontales desde sus extremos mediante una espiga.

Por otro lado, el sistema constructivo entramado de madera pesado o Timber frame, caracterizado por el uso de pórticos de madera, se desarrolló en Europa alrededor del año 5.500 debido a la necesidad de espacios más amplios para almacenamiento agrícola (Guindos 2019). En el siglo XVII, esta tipología fue exportada a Norteamérica, y según Peraza et al. (1995), se caracterizó por solucionar la unión de elementos mediante ensambles carpinteros que, con el tiempo, se sofisticaron, aumentando la rigidez de la conexión. Sin embargo, la pérdida de sección llevó a la necesidad de aumentar el volumen y, por ende, el peso de las piezas.

Dentro del entramado pesado o Timber frame, destaca el popular sistema conocido como box frame (ver figura 4), comúnmente utilizado en Inglaterra desde el siglo XIX para la construcción de casas de campo (Jiménez, 2014). Este sistema estructural se caracteriza por una sucesión de marcos pesados de grandes escuadrias, utilizados como bastidores para los elementos madereros verticales de menor tamaño que configuran los muros exteriores y tabiques (Lewis, 2014). Según Lewis (2014), quien estudió los sistemas tradicionales de entramado de madera de Nueva Zelanda, con el paso del tiempo, los marcos pesados como los de los sistemas box frame se volvieron innecesarios y la configuración de la estructura secundaria se convirtió en el principal sistema constructivo, dando paso al sistema conocido como Stud frame en dicho territorio, y que fue utilizado para pequeñas construcciones (Jiménez, 2014).

El sistema Stud frame (figura 5) se compone de elementos verticales conocidos como pies derechos, de escuadrías que varían entre 6"x6", 4"x6" y 4"x4". Estos pies derechos se ensamblan sobre travesaños superior e inferior denominados solera, separados entre 40 y 70 cm, comúnmente mediante ensambles caja y espiga (Jiménez, 2014). Las conexiones entre elementos se realizan mediante uniones carpinteras fabricadas a manos. El ensamble caja y espiga es una de las uniones más común, diseñada para transmitir esfuerzos de compresión, a través de las superficies de contacto (Lewis, 2014). Además, esta técnica incorpora riostras diagonales entre los pies derechos para rigidizar los muros, presentando diversas formas, ya sea en cruz de san Andrés, en "K" o "V", dependiendo de la disposición de vanos y la longitud (Peraza et al., 1995).

Otra tipología arquetípica de los sistemas constructivos de entramado de madera es el ballon frame, clasificado como un entramado ligero. Esta técnica, según estipula Jiménez (2014), surgió del "continuo desarrollo y refinamiento de las técnicas constructivas en madera como el Timber frame y Stud frame". Esta técnica ganó protagonismo en la revolución industrial en Norteamérica debido a la estandarización de materiales como la madera y el clavo, usándose hasta la costa del pacífico (Barros & Sarabia, 2016).

El sistema constructivo ballon frame se caracteriza por "una serie de piezas de madera equidistantes, que forman paredes, entrepisos y techumbres" (Leser, 1990). Estas piezas, aserradas y dimensionadas, varían entre 2"x4", 2"x6" y 2"x8" (Jiménez, 2014). Las vigas y pies derechos se disponen a una distancia reducida de 40 a 60 cm, unidas mediante clavos. En estos casos, la industrialización del clavo y su uso masivo en la construcción reemplazó las complejas uniones carpinteras por la conexión de elementos de madera

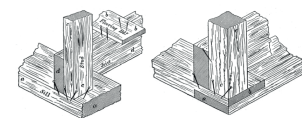
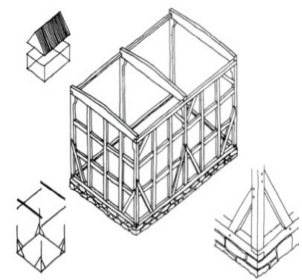


Fig. 4 Box frame construction. (Brunskill, 1976).

Fig. 5 Sistema constructivo Stud frame: entramado de muro (Lewis, 2014).

Fig. 6 Sistema constructivo Ballon frame: detalles de las uniones clavadas simple. (Burn, 1873).

mediante el uso de clavos de acero industrializados (Figura 6), generando un sistema más simple, fácil y rápido de construir, sin la necesidad de mano de obra calificada (Jiménez, 2014).

El sistema ballon frame evoluciono con el avance de la tecnología constructiva hasta convertirse en el actual sistema de plataforma o platform frame (Dávila & Contreras, 2022; Jiménez, 2014). Según Jiménez (2014), el platform frame se caracteriza por el uso de los mismos elementos estandarizados del ballon frame, diferenciándose en su morfología y el proceso constructivo. En el platform frame, los pies derechos quedan interrumpidos en cada nivel de piso por las soleras de amarre y las estructuras de entrepiso, permitiendo más de dos niveles. Los pies derechos se clavan sobre la solera inferior, y luego se coloca la solera superior, configurando el muro aun en el suelo, listo para ser levantada y clavados sobre el piso (Figura 7).



Fig. 7  
Sistema constructivo platform frame (Obrien, 2010).

Fig. 8  
Sistema constructivo "Quincha" (MINVU, 2017).

Fig. 9  
Fotografía quincha con citara (MINVU, 2017).

Fig. 10  
Fotografía del ensamblaje caja y espiga utilizado para conectar pies derechos y solera. (Torrealva et al., 2018).

Por otro lado, en diversas zonas de Latinoamérica también se desarrollaron técnicas constructivas de madera como fue la quincha, que proliferó debido a la predisposición sísmica y al carácter antisísmico de la técnica (Silva, 2018). La quincha es una técnica mixta que se configura con marcos de madera y un entramado vegetal interno que sostiene y consolida el relleno de barro en el muro (Garzón, 2011). El muro posee un entramado de cañas dobles colocadas en sentido vertical y horizontal para evitar deformación de la estructura de madera (Chácara, 2013). Esta técnica utiliza elementos verticales conocidos como postes y horizontales como soleras, conectados mediante ensamble tipo caja y espiga como se observa en la Figura 8 (Silva, 2018). En la quincha, como observa en la Figura 8, los marcos incorporan elementos que rigidizan la estructura, como la citara (diagonales en la parte inferior del muro) y diagonales que arriostran la estructura (Figura 9-10). Según Tomasi & Bellmann (2018), la quincha mejora el comportamiento el comportamiento de las construcciones mixtas de tierra y madera sometidas a acciones horizontales proporcionándoles mayor rigidez.

En conclusión, los sistemas constructivos tradicionales de madera han evolucionado con el tiempo, de la mano de los avances tecnológicos y la necesidad de un buen desempeño sísmico. Según expone D N & Menon (2019), muchos de los sistemas constructivos tradicionales de entramado de maderas fueron desarrollados tras la ocurrencia de terremotos. Ejemplos de ello son las construcciones tipo Pombalino surgidas tras el terremoto de Lisboa en 1755, la casa Barracata tras el terremoto de Calabria en 1783, y el sistema Pontelarisma en Lefkada tras el terremoto de 1825 en Grecia. Autores como Chen et al., (2016) y Zhao et al., (2019) explican que las técnicas y tecnologías utilizadas en antiguas estructuras de madera proporcionan buen comportamiento sísmico, lo que ha permitido que muchos inmuebles históricos sigan en pie a pesar de los terremotos. No obstante, el deterioro debido al envejecimiento y diversas patologías amenazan la conservación de estas estructuras.

### 1.1.2 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y SÍSMICO

Las fuerzas sísmicas generadas por los terremotos se manifiestan en los edificios debido a la inercia resultante de la respuesta dinámica de la estructura antes los movimientos del suelo, impactando principalmente en los elementos más pesados, como lo son los forjados y la cubierta (FSC España 2018). En los sistemas constructivos de entramado de madera la materialidad y la distribución de los elementos estructurales y no estructurales es determinante en el comportamiento de las estructuras durante un evento sísmico (Barrientos (2016). Asimismo, Torroja (2010)

de la madera para el ensamble entre elementos. La segunda, usa troncos redondos con una conexión tipo cuña generada mediante un labrado en forma de prima trapezoidal en los extremos. La tercera, consiste en una pieza vertical o glisser con acanaladuras longitudinales donde se encajan los troncos horizontales desde sus extremos mediante una espiga.

Por otro lado, el sistema constructivo entramado de madera pesado o Timber frame, caracterizado por el uso de pórticos de madera, se desarrolló en Europa alrededor del año 5.500 debido a la necesidad de espacios más amplios para almacenamiento agrícola (Guindos 2019). En el siglo XVII, esta tipología fue exportada a Norteamérica, y según Peraza et al. (1995), se caracterizó por solucionar la unión de elementos mediante ensambles carpinteros que, con el tiempo, se sofisticaron, aumentando la rigidez de la conexión. Sin embargo, la pérdida de sección llevo a la necesidad de aumentar el volumen y, por ende, el peso de las piezas.

Dentro del entramado pesado o Timber frame, destaca el popular sistema conocido como box frame (ver figura 4), comúnmente utilizado en Inglaterra desde el siglo XIX para la construcción de casas de campo (Jiménez, 2014). Este sistema estructural se caracteriza por una sucesión de marcos pesados de grandes escuadrias, utilizados como bastidores para los elementos madereros verticales de menor tamaño que configuran los muros exteriores y tabiques (Lewis, 2014). Según Lewis (2014), quien estudió los sistemas tradicionales de entramado de madera de Nueva Zelanda, con el paso del tiempo, los marcos pesados como los de los sistemas box frame se volvieron innecesarios y la configuración de la estructura secundaria se convirtió en el principal sistema constructivo, dando paso al sistema conocido como Stud frame en dicho territorio, y que fue utilizado para pequeñas construcciones (Jiménez, 2014).

El sistema Stud frame (figura 5) se compone de elementos verticales conocidos como pies derechos, de escuadrías que varían entre 6"x6", 4"x6" y 4"x4". Estos pies derechos se ensamblan sobre travesaños superior e inferior denominados solera, separados entre 40 y 70 cm, comúnmente mediante ensambles caja y espiga (Jiménez, 2014). Las conexiones entre elementos se realizan mediante uniones carpinteras fabricadas a manos. El ensamble caja y espiga es una de las uniones más común, diseñada para transmitir esfuerzos de compresión, a través de las superficies de contacto (Lewis, 2014). Además, esta técnica incorpora riostras diagonales entre los pies derechos para rigidizar los muros, presentando diversas formas, ya sea en cruz de san Andrés, en "K" o "V", dependiendo de la disposición de vanos y la longitud (Peraza et al., 1995).

Otra tipología arquetípica de los sistemas constructivos de entramado de madera es el ballon frame, clasificado como un entramado ligero. Esta técnica, según estipula Jiménez (2014), surgió del "continuo desarrollo y refinamiento de las técnicas constructivas en madera como el Timber frame y Stud frame". Esta técnica gana protagonismo en la revolución industrial en Norteamérica debido a la estandarización de materiales como la madera y el clavo, usándose hasta la costa del pacifico (Barros & Sarabia, 2016).

El sistema constructivo ballon frame se caracteriza por "una serie de piezas de madera equidistantes, que forman paredes, entrepisos y techumbres" (Leser, 1990). Estas piezas, aserradas y dimensionadas, varían entre 2"x4", 2"x6" y 2"x8" (Jiménez, 2014). Las vigas y pies derechos se disponen a una distancia reducida de 40 a 60 cm, unidas mediante clavos. En estos casos, la industrialización del clavo y su uso masivo en la construcción reemplazo las complejas uniones carpinteras por la conexión de elementos de madera

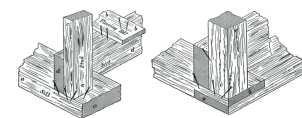
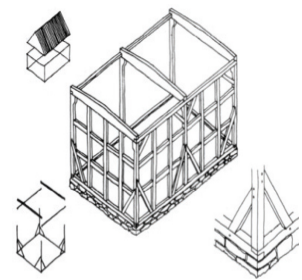


Fig. 4 Box frame construction. (Brunskill, 1976).

Fig. 5 Sistema constructivo Stud frame: entramado de muro (Lewis, 2014).

Fig. 6 Sistema constructivo Ballon frame: detalles de las uniones clavadas simple. (Burn, 1873).

mediante el uso de clavos de acero industrializados (Figura 6), generando un sistema más simple, fácil y rápido de construir, sin la necesidad de mano de obra calificada (Jiménez, 2014).

El sistema ballon frame evoluciono con el avance de la tecnología constructiva hasta convertirse en el actual sistema de plataforma o platform frame (Dávila & Contreras, 2022; Jiménez, 2014). Según Jiménez (2014), el platform frame se caracteriza por el uso de los mismos elementos estandarizados del ballon frame, diferenciándose en su morfología y el proceso constructivo. En el platform frame, los pies derechos quedan interrumpidos en cada nivel de piso por las soleras de amarre y las estructuras de entrepiso, permitiendo más de dos niveles. Los pies derechos se clavan sobre la solera inferior, y luego se coloca la solera superior, configurando el muro aun en el suelo, listo para ser levantada y clavados sobre el piso (Figura 7).



Fig. 7  
Sistema constructivo platform frame (Obrien, 2010).

Fig. 8  
Sistema constructivo "Quincha" (MINVU, 2017).

Fig. 9  
Fotografía quincha con citara (MINVU, 2017).

Fig. 10  
Fotografía del ensamblaje caja y espiga utilizado para conectar pies derechos y solera. (Torrealva et al., 2018).

Por otro lado, en diversas zonas de Latinoamérica también se desarrollaron técnicas constructivas de madera como fue la quincha, que proliferó debido a la predisposición sísmica y al carácter antisísmico de la técnica (Silva, 2018). La quincha es una técnica mixta que se configura con marcos de madera y un entramado vegetal interno que sostiene y consolida el relleno de barro en el muro (Garzón, 2011). El muro posee un entramado de cañas dobles colocadas en sentido vertical y horizontal para evitar deformación de la estructura de madera (Chácara, 2013). Esta técnica utiliza elementos verticales conocidos como postes y horizontales como soleras, conectados mediante ensamble tipo caja y espiga como se observa en la Figura 8 (Silva, 2018). En la quincha, como observa en la Figura 8, los marcos incorporan elementos que rigidizan la estructura, como la citara (diagonales en la parte inferior del muro) y diagonales que arriostran la estructura (Figura 9-10). Según Tomasi & Bellmann (2018), la quincha mejora el comportamiento el comportamiento de las construcciones mixtas de tierra y madera sometidas a acciones horizontales proporcionándoles mayor rigidez.

En conclusión, los sistemas constructivos tradicionales de madera han evolucionado con el tiempo, de la mano de los avances tecnológicos y la necesidad de un buen desempeño sísmico. Según expone D N & Menon (2019), muchos de los sistemas constructivos tradicionales de entramado de maderas fueron desarrollados tras la ocurrencia de terremotos. Ejemplos de ello son las construcciones tipo Pombalino surgidas tras el terremoto de Lisboa en 1755, la casa Barracata tras el terremoto de Calabria en 1783, y el sistema Pontelarisma en Lefkada tras el terremoto de 1825 en Grecia. Autores como Chen et al., (2016) y Zhao et al., (2019) explican que las técnicas y tecnologías utilizadas en antiguas estructuras de madera proporcionan buen comportamiento sísmico, lo que ha permitido que muchos inmuebles históricos sigan en pie a pesar de los terremotos. No obstante, el deterioro debido al envejecimiento y diversas patologías amenazan la conservación de estas estructuras.

### 1.1.2 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y SÍSMICO

Las fuerzas sísmicas generadas por los terremotos se manifiestan en los edificios debido a la inercia resultante de la respuesta dinámica de la estructura antes los movimientos del suelo, impactando principalmente en los elementos más pesados, como lo son los forjados y la cubierta (FSC España 2018). En los sistemas constructivos de entramado de madera la materialidad y la distribución de los elementos estructurales y no estructurales es determinante en el comportamiento de las estructuras durante un evento sísmico (Barrientos (2016). Asimismo, Torroja (2010)

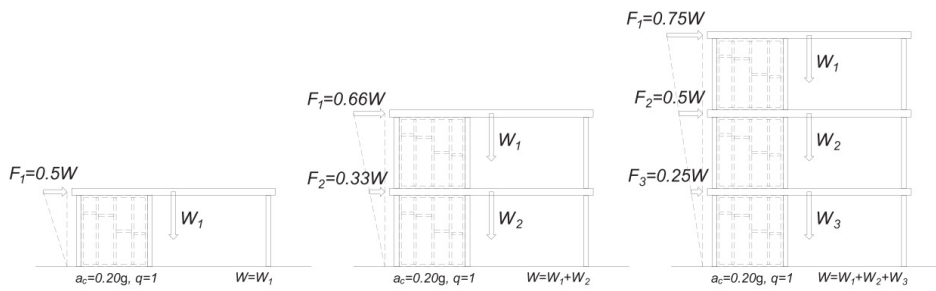


Fig. 11 Diagrama de la distribución de las fuerzas sísmicas en altura en una edificación (FSC España, 2018).

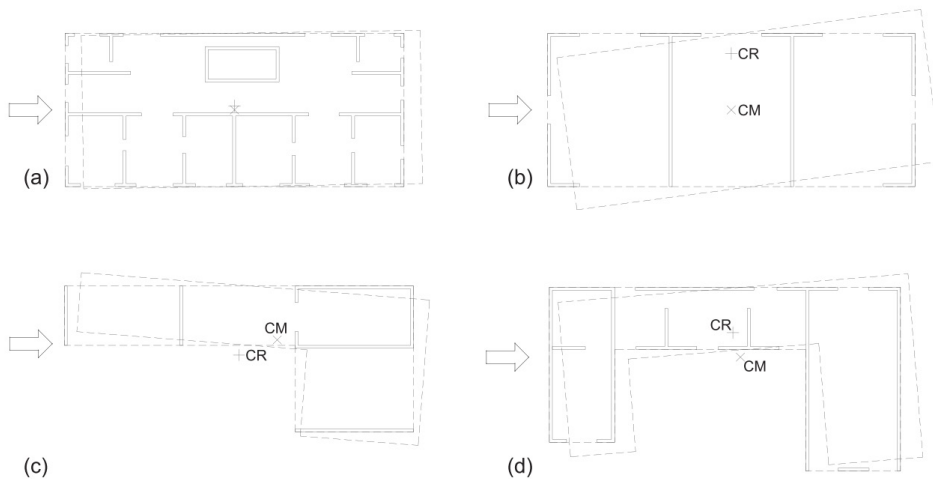


Fig. 12 Diagrama de la distribución de muros y torsión ante una carga lateral. (FSC España, 2018).

explica que la resistencia de una edificación tiene directa relación con los materiales empleados, producto de las cualidades mecánicas asociadas a estos.

Por otro lado, FSC España (2018) añade que las fuerzas sísmicas se distribuyen entre las plantas de manera proporcional al producto del peso de la planta por la altura de la planta desde el suelo (Figura 11). A su vez, tal como se observa en la Figura 12, si la distribución de muros es irregular, es decir, plantas asimétricas o con forma de C, E, L, T, U, X, el daño se concentrará en los elementos situados en los extremos de la planta y en las esquinas debido a los fenómenos de torsión por la implantación de nuevas solicitaciones en la estructura producidas por los sismos.

Inat (2011) argumenta que los entramados de madera ligero no transmiten demasiada energía durante un movimiento telúrico, ya que, al ser estructuras flexibles, absorben y disipan la energía transmitida desde el terreno natural de manera más eficiente. Además, la combinación de elementos portantes ligeros como los entramados de madera que trabajan en conjunto con las capas de cerramientos o revestimientos aportan al armazón la resistencia y rigidez necesaria para actuar eficientemente antes acciones verticales y horizontales que se presentan en un terremoto u otro fenómeno.

### 1.1.3 DUCTILIDAD Y DISIPACIÓN DE ENERGÍA

La buena capacidad de disipación de energía es una característica común de los sistemas constructivos de entramado de madera, fenómeno que se produce cuando los materiales superan el límite elástico y se deforman de manera dúctil (FSC España, 2018). En las estructuras de entramado este comportamiento está directamente relacionado con la ductilidad de las uniones y la redundancia estructural que estas ofrecen en las estructuras. La multiplicidad de uniones en una estructura de entramado contribuye a la

redundancia estructural de las edificaciones, permitiendo que las estructuras se mantengan en pie a pesar de que puedan existir daños parciales en algunos elementos estructurales (Branco & Descamps, 2015).

En los entramados ligeros, los paneles de muros y diagramas configurados con elementos conectados entre sí a través de clavos o tornillos le otorgan al sistema estructural rigidez lateral y vertical, y una alta capacidad de disipación de energía (FSC España, 2018). Según (FSC España (2018), la ductilidad se consigue aplicando el concepto de “proyecto por capacidad” que consiste en asegurar que los elementos se mantengan intactos y que las deformaciones se produzcan en las uniones. Las uniones absorben la energía sísmica y deben soportar grandes deformaciones sin colapsar, mientras que los elementos de madera deben ser capaces de resistir las cargas transmitidas por las uniones. En estos casos, la madera se considera como un elemento frágil, mientras que las uniones son los elementos dúctiles (donde se generan las deformaciones).

En las estructuras tradicionales de entramado de madera, el buen comportamiento de las estructuras de madera no solo se asocia al comportamiento semirrígido y dúctil de las uniones carpinteras, sino también a la robustez de los elementos dentro del armazón. En estos casos, las uniones también son las encargadas de transmitir las cargas desde la techumbre hasta las fundaciones, y las que permiten mantener el carácter monolítico de las estructuras (FSC España, 2018). Esta buena reputación antisísmica también se debe en parte a las numerosas evidencias encontradas tras terremotos en diferentes territorios, tales como Japón, Nueva Zelanda, Estados Unidos o Chile, donde las estructuras han resistido con niveles de daños y costes de reparación razonables (FSC España, 2018). No obstante, esta característica, Parisi & Piazza (2000) aseveran que a menudo la rehabilitación de edificios históricos requiere la readaptación de las conexiones tradicionales de madera debido al daño que puede producirse en las mismas.

#### 1.1.4 DAÑOS SÍSMICOS EN LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES POST-TEREMOTO

De acuerdo con Yu et al. (2022), los frecuentes terremotos, la erosión ambiental, y la falta de mantenimiento regular, entre otras causas, generan que las estructuras de madera, y especialmente las uniones, sufran daños de diversa naturaleza, viendo disminuida su capacidad resistente y la rigidez (Manetti 2020). Ante esta situación, las estructuras se vuelven especialmente vulnerables en el caso de ocurrir una réplica o temblor de menor magnitud. Cuando las estructuras pierden sus capacidades originales quedan relegadas a escenarios inciertos de desempeño sísmico, especialmente cuando los daños se producen en las uniones, que son las encargadas de transmitir las cargas a través de la estructura.

Los daños o debilidades sísmicas más comunes en las estructuras históricas de entramado de madera tienen que ver con el aflojamiento o fallo de las conexiones, con la ocurrencia de grandes desplazamientos laterales y desprendimiento de los rellenos de los marcos (Doğangün et al., 2006). Por ejemplo, Qu et al. (2015), bajo el estudio realizado en zonas del suroeste de China sobre daños causados por terremotos, encontró que las juntas de caja y espiga en las estructuras de entramado de madera fueron arrancadas y destruidas, provocando la inclinación de los tejados o derrumbe del armazón de madera (Figura 13). Yu et al. (2022) explica que este tipo de fenómeno generalmente se debe a la contracción y deformación por extrusión de la espiga, lo que provocó la degradación de las propiedades mecánicas de la unión, conduciendo, finalmente, a la destrucción de toda la estructura.



Fig. 13  
Fotografías del colapso en estructura de entramado de madera rellenos con mampostería (Qu et al., 2015).

Por otro lado, Doğangün et al. (2006) explica que la presencia de un piso blando resulta en un aumento significativo en las demandas de deformación y pone la carga de la disipación de energía en los elementos estructurales del primer piso. Los edificios tradicionales de Turquía, por lo general, no presentan elementos rigidizadores, por lo tanto, no tienen mucha resistencia lateral, por lo que responden ante fuerzas sísmicas balanceándose con ellas, en lugar de resistirlas (Doğangün et al., 2006). Sin embargo, a pesar de poseer este tipo de refuerzos, si los elementos de arriostramiento no están dimensionados para resistir las cargas laterales, se tenderán a provocar las fallas en las conexiones del primer piso, tal como se muestra en la Figura 14-15.

Aranha & Branco (2021) explican que en estudios de evaluación realizados después de terremotos en edificio de madera dañados, se ha observado que una de las principales causas de fallo es la insuficiencia de las articulaciones bajo cargas sísmicas. Esto se debe a factores clave como la correcta transferencia de cargas de los techos a las paredes y la rigidez en el plano de pisos y techos. Para la estabilidad estructural durante un terremoto, si estos elementos no son lo suficientemente rígidos, no pueden distribuir las cargas sísmicas de manera uniforme, lo que puede llevar a un comportamiento inadecuado y eventual colapso. Aranha & Branco (2021) añaden que durante los sismos, la inversión de cargas requiere el uso de piezas metálicas o taco de madera como refuerzo para contrarrestar tensiones de tracción y movimientos fuera del plano. Cualquier daño en las uniones carpinteras o elementos de refuerzo conlleva a la pérdida de la funcionalidad de la articulación (Figura 16).

En Chile, también se ha comprobado el carácter antisísmico de diversas tipologías constructivas de entramado de madera de antigüedad centenaria que han resistido al impacto de varios terremotos históricos y sismos de mediana intensidad. Algunos registros que lo demuestran son, por ejemplo, el trabajo de Waisberg (1998) que caracteriza las viviendas de tipología victoriana de entramado de madera en el barrio de Playa Ancha (Valparaíso, Chile), construidas a finales del siglo XIX y comienzo del siglo XX, que han resistido a los terremotos ocurridos en los años 1906, 1965 y 1971. No obstante, existen diferentes registros que demuestran que este tipo de estructuras si se han visto afectadas por los terremotos (Figura 17-18).

La Figura 18 muestra diferentes inmuebles afectados por terremotos. En estas se aprecian daños parciales en las estructuras de entramado de madera, volcamiento de adobillos y la pérdida de los revoques del edificio. Asimismo, se aprecia el desprendimiento parte de la estructura de entramado de entramado madera debido a fallos en las uniones carpinteras presentes en la conexión entre pies derechos y solera, es decir, el ensamble caja y espiga.



Fig. 14-15

Fotografías Edificios tradicionales de madera dañados debido al piso blando: (a) inmuebles tradicionales desplazado lateralmente; (b) fallo de las conexiones durante el terremoto de Kocaeli de 1999 (Doğangün et al., 2006).

Fig. 16

Fotografía Aflojamiento ensamble embarbillado en estructura de techumbre producto de un sismo.(Aranha & Branco, 2021).

Fig. 17

Fotografías de daños registrados en edificios de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso en los terremotos del año (a) 1906 y (b) 2010.



Fig. 18

Fotografías de daños registrados en edificios de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso en los terremotos del año 2010.



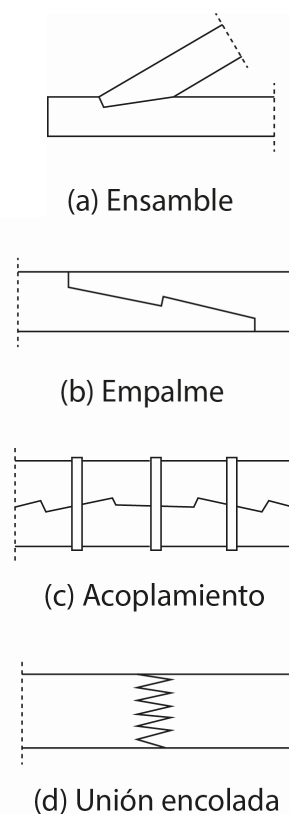
## 1.2 LAS UNIONES CARPINTERAS: TIPOLOGÍAS Y ROL ESTRUCTURAL

La carpintería de armar es un método ancestral centrado en el diseño y la construcción de estructuras de madera, utilizada por maestros carpinteros especializados para unir dos o más piezas de manera segura y férrea desde hace siglos. Según Schmidt & Mackay (1997), este tipo de uniones fueron creadas entre 500 y 200 A.C., y se definen como conexiones semirrígidas entre los elementos de un entramado. Estas uniones fueron populares hasta mediados del siglo XIX, y su diseño y fabricación dependían de la experiencia y habilidad de los maestros carpinteros de la época (Quitral et al., 2020).

La configuración de las uniones labradas para estructuras en carpintería suele ser complejas y atestiguan a un alto nivel de creación y artesanía. González & Maino (2019) explican que “la carpintería de armar promueve un sistema constructivo basado en la prefabricación en obra o taller de componentes de madera que se encajan y se traban para formar un continuo resistente, pero que sin embargo pueden ser desmontados individualmente para ser reparados o reemplazados sin necesariamente comprometer la integridad de una estructura en pie”. Este saber de creación y elaboración fue transmitido a través de la práctica y la imitación, de tal manera que se generó una forma de hacer que permaneció en el tiempo, por medio de aprendices convertidos en maestros, quienes transmitieron los conocimientos a nuevas generaciones de artesanos (Cherubini, 2019).

La diversidad de uniones carpinteras que existen en la actualidad son el resultado de un proceso de prueba y error a lo largo del tiempo, el cual ha buscado garantizar la transmisión de esfuerzos y mantener la firmeza de los enlaces entre los elementos del armazón de madera (Urbán, 2012). Las uniones tradicionales se emplean en el encuentro entre las distintas piezas del sistema constructivo de entramado de madera, proporcionando resistencia estructural mediante técnicas precisas de tallado y ensamblaje, sin la mediación de otros materiales, otorgando continuidad geométrica, y distribuyendo las cargas y tensiones a través de toda la estructura (García, 2016). Autores como Arriaga et al. (2011) y Branco & Descamps, (2015) establecen que las uniones constituyen un punto singular y necesario de estudiar en el ámbito de los entramados de madera, ya que el agotamiento de una estructura se puede presentar simplemente por la falla de la resistencia de cualquier unión carpintera, otorgándole un carácter prioritario dentro del armazón, producto de la estabilidad, rigidez y resistencia que generan dentro del sistema.

En la literatura existen diversas formas de clasificar los tipos de uniones carpinteras. Autores como Arriaga et al. (2011), García (2016), González & Maino (2019), Jiménez, (2015) y Quitral et al. (2020) coinciden en que el encuentro entre miembros de una estructura de entramado de madera se puede categorizar en tipologías según sea la orientación angular y el propósito de la junta, en las siguientes categorías: empalmes, ensambles, acoplamientos y uniones encoladas. De este modo, se conoce como ensamble (Figura 16a) al encuentro en esquina, intermedio, o cruzado formando un ángulo determinado a través de un entallado. La unión tipo empalme (Figura 16 b) implica la unión lineal de dos miembros en la misma dirección para lograr una mayor longitud de las piezas, a veces acompañada por herrajes metálicos para evitar la separación de las piezas. La unión tipo acoplamiento (Figura 16c) consiste en la superposición lineal de las pizas a través de sus caras con el fin de obtener una mayor sección resistente en toda su extensión. Por último, las juntas encoladas (Figura 16d) corresponden a la unión de dos piezas mediante el uso de adhesivo. A continuación, se explicarán más en detalle las características de cada una de estas categorías de uniones.

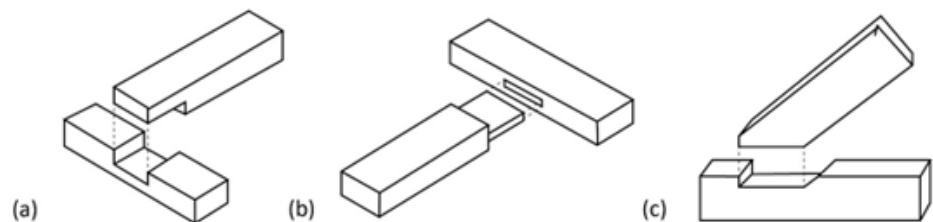


**Fig. 19**  
Diagrama de las tipologías de uniones carpinteras: (a) empalme; (b) ensamble; (c) acoplamiento; (d) unión encolada. (Arriaga et al., 2011; García, 2016)..

### 1.2.1 ENSAMBLES

Las uniones ensambladas fueron diseñadas con el propósito de transmitir esfuerzos de compresión a través de las caras de contacto. En términos generales, este tipo unión transmite las cargas de una pieza a otra a través de las cajas, rebajes, espiga o llaves, que son elementos canalizadores de fuerzas axiales resultantes de la compresión y esfuerzos tangenciales que sufre el sistema de entramado de madera (Gill, 2017). Urbán (1996) explica que los ensambles de nudo permiten resolver encuentros en forma de cruz y esquina, mientras que los ensambles de espera facilitan la transmisión de empujes mediante cortes en testa en ángulos diedros convexos, a diferencia de las uniones tipo barbilla que presentan cortes cóncavos. En este mismo marco teórico, García (2016) categoriza en la tipología ensamble a las uniones de caja, caja y espiga, y entalladura (Figura 20), donde el término “caja”, correspondiente a la definición de nudo, se asocia con a las uniones a media madera (Figura 20a), mientras que en el ensamble “caja y espiga”, se asocia con las uniones de espera (Figura 20b). Por último, los ensambles de entalladura se asocian con los del tipo barbilla (Figura 20c).

Fig. 20  
Diagrama de las categoría de ensambles: (a) caja; (b) caja y espiga; (c) entalladura.



La unión caja y espiga, también conocida como mortaja y espiga, es una de las más utilizadas en las estructuras de entramado de madera, e implica la conexión entre dos elementos perpendiculares mediante piezas labradas en cada elemento de madera, generando una conexión sólida gracias al ajuste perfecto entre ambas. La espiga es la parte labrada en el extremo de un elemento de madera en forma de paralelepípedo, la cual se inserta en la entalladura del otro elemento, denominado caja o mortaja, como muestra la Figura 21a (Arriaga et al. 2011).

Los ensambles de caja implican el rebaje en una de las piezas, lo que genera un encaje a media sección de la madera. Según explica García (2016) existen principalmente dos tipos de ensambles. En primer lugar, está el ensamble a media madera, que implica el rebaje a media sección en ambos elementos, dejándolos con el mismo espesor. Esta conexión solo resiste esfuerzos que actúan en su plano y se utiliza comúnmente entre jácenas y viguetas de forjado o entre parte y cubiertas en la techumbre (Figura 21b). En segundo lugar, se encuentra la unión cola de milano, en la cual, a diferencia de la anterior, la pieza no es recta, sino más bien trapezoidal. Se denomina “a media madera” cuando se realiza a la mitad del espesor del otro elemento (Figura 21c). Según Arriaga et al. (2011) la cola de milano es un ensamble capaz

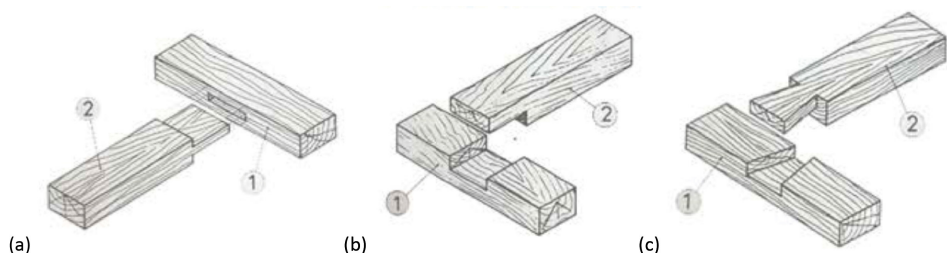


Fig. 21  
Tipos de ensamble: (a) caja y espiga; (b) a media madera; (c) cola de milano. (García, 2016).

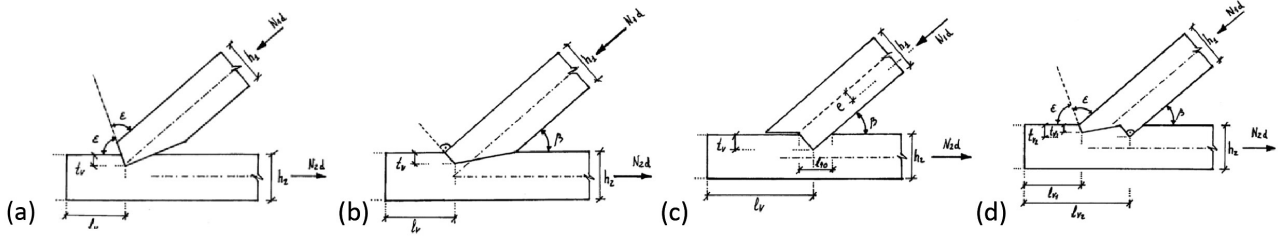


Fig. 22 Diagramas del ensamblaje de embarbillado: (a) frontal o simple; (b) en ángulo recto; (c) de talón; (d) doble con talón. (Arriaga et al., 2011).

de transmitir fuerzas de tracción y compresión, aunque con una capacidad portante reducida.

Los ensamblajes de entalladura son uniones en las que ambas piezas se cortan a menos de media sección y se ensamblan en un ángulo específico. De acuerdo con García (2016), los ensamblajes de horiquilla o tijera son aquellos en los que una parte se encaja con una espiga, mientras que la otra recibe un ranurado en la parte central del elemento de manera inclinada. Por otro lado, Arriaga et al. (2011) describe el ensamblaje de barbilla como una junta en la que una pieza se encaja mediante un entalle. Este tipo de ensamblaje se utiliza con frecuencia en las estructuras de techumbres, especialmente entre el par y el tirante, y presenta tres principales variaciones.

La primera es el embarbillado frontal o simple, en el cual el ángulo de corte de la barbilla es la bisectriz del ángulo obtuso  $2\varepsilon$  (Figura 22a). El embarbillado en ángulo recto se diferencia del anterior porque la barbilla se corta a  $90^\circ$  (Figura 22b). Arriaga et al. (2011) explica que esta configuración tiene una capacidad carga inferior debido a que el ángulo recto reduce la resistencia a la compresión oblicua. El embarbillado de talón se realiza en la parte posterior del par con el objetivo de resistir el esfuerzo rasante sin aumentar la longitud del tirante en las estructuras de techumbre (Figura 22c). El embarbillado doble combina una solución tipo barbilla frontal con un corte en la parte posterior de la barbilla correspondiente al “talón” en ángulo recto (Figura 22d).

1.2.2 EMPALMES

Las uniones tipo empalme (Figura 23) se utilizan principalmente para conseguir mayor longitud en diferentes elementos de una estructura de madera. Según García (2016), generalmente, estas uniones trabajan a compresión y a tracción, aunque en muchas ocasiones cumplen únicamente una función constructiva. García (2016) las segmenta en tres categorías: empalmes verticales, que trabajan a compresión y pueden ser a media madera, con espiga o pico de flauta; los empalmes en piezas horizontales, como en el caso de las vigas, que están sometidas a flexión y suelen cumplir solo con dar continuidad geométrica al elemento con el apoyo de elementos de fijación.

Arriaga et al. (2011) menciona la unión tipo empalme de llave, reconocida como empalme horizontal, utilizada en el encuentro entre elementos que conforman los tirantes en las estructuras de techumbre, transmite esfuerzos a tracción a través de una compresión paralela a a fibra. Finalmente, existen los conocidos como empalmes de rayo de jupiter y dentados, uniones

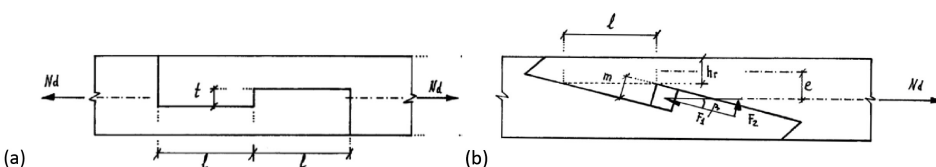


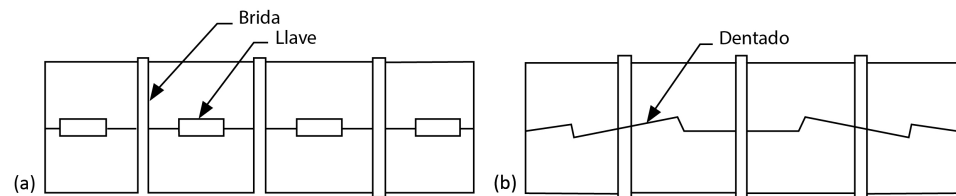
Fig. 23 Diagramas del ensamblaje de empalme: (a) frontal o simple; (b) en ángulo recto; (c) de talón; (d) doble con talón. (Arriaga et al., 2011).

que transforman la tracción en compresión según el plano de contacto y suelen utilizar tacos que se acuñan entre piezas para asegurar el correcto funcionamiento de los planos de contacto. Arriaga et al. (2011) explica que la unión jabalcón rayo de jupiter es una de las más tradicionales en los tirantes de las cerchas, y generalmente se añaden pernos o abrazaderas para reforzar mecánicamente la unión y evitar la tendencia al giro debido a la poca capacidad de resistencia de la junta.

### 1.2.3 ACOPLAMIENTOS

Las uniones acopladas consisten en la conexión de dos o más piezas mediante una unión carpintera con la ayuda de elementos externos como pernos, clavos, o tacos transversales, acuñados para asegurar la junta. De acuerdo con García (2016), los acoplamientos más usuales en construcciones históricas son los de redientes, cremalleras y llaves (Figura 24). Aunque todas ellas tienen como objetivo mantener la unión de los elementos, existen dos que son los más destacados: los redientes con tacos y las llaves, las cuales permiten la transmisión de esfuerzos.

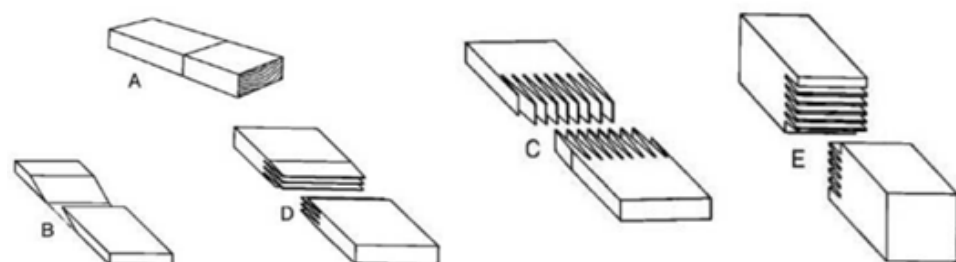
Fig. 24  
Diagramas acopladura de: (a) llave; (b) rediente. (García, 2016).



### 1.2.4 UNIONES ENCOLADAS

Las uniones encoladas se logran mediante el uso de adhesivos para mantener unidos los elementos y transmitir esfuerzos. García (2016) expone las ventajas de este tipo de conexión, como la posibilidad de fabricar piezas de madera sin limitaciones de longitud del material, su fácil industrialización y la creación de uniones menos visibles y más pulcras sin debilitar la zona de unión. Si embargo, como desventaja, destaca que el fallo de las uniones encoladas puede ocurrir sin previo aviso, siendo dependiente de una correcta ejecución de esta. Condom (2014) explica que existen diversos tipos de estas uniones, siendo las más comunes la unión encolada de punta (Figura 25a), la de corte simple (Figura 25b), las uniones tipo dedos de madera o fingerjoint de forma horizontal (Figura 25c), no estructural (Figura 25d), o vertical (Figura 25e). Condom (2014) además añade que este tipo de unión es comúnmente utilizada en madera laminada, especialmente las uniones tipo fingerjoint, debido a que entrega una mayor resistencia y una mejor distribución de las cargas a lo largo de la unión, evitando que se concentren en áreas específicas, de esta forma reduciendo el riesgo de falla.

Fig. 25  
Diagramas uniones encoladas: (a) unión de punta; (b) unión de corte simple; (c) unión vertical estructural fingerjoint; (d) unión horizontal estructural fingerjoint; (e) unión no estructural fingerjoint. (Vick, 1999).



### 1.2.5 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y SÍSMICO DE LAS UNIONES CARPINTERAS

Las uniones carpinteras son el método tradicional de anclaje utilizado en inmuebles históricos de entramado de madera. Las juntas son zonas críticas de las estructuras, al ser las encargadas de transmitir las cargas por contacto directo entre los diferentes elementos que conforman un armazón de madera, manteniendo y asegurando la unidad e integridad de las estructuras durante un sismo (Yu et al., 2022). Parisi & Piazza (2000) explican que las uniones carpinteras son capaces de equilibrar los esfuerzos axiales y cortante mediante la compresión local, esfuerzos tangenciales, y roce entre las caras de contacto por sí solas. No obstante, muchas veces se incorporan elementos metálicos con el cometido de mantener la continuidad de las caras de contacto.

Por otro lado, Xue et al. (2020) argumenta que la capacidad de flexión de las uniones es proporcionada principalmente por la deformación plástica generada por la fricción. Sin embargo, según explican Zhao et al. (2019) son múltiples los factores que afectan a la respuesta estructural global de las estructuras de madera, tales como el envejecimiento de la madera, daños por terremotos, plagas, entre otros. Poletti et al. (2015) añade que es el comportamiento de las conexiones es uno de los factores más importantes en la respuesta del muro, y que la presencia de imperfecciones en las mismas, tales como pequeños huecos entre los elementos que componen la unión, generan efectos negativos que afectan a la capacidad y resistencia global de la estructura.

Las uniones carpinteras son susceptibles a los cambios en las cargas de uso de los edificios. Cardone et al., (2019) argumenta que en muchas ocasiones los edificios históricos se construyeron para soportar cargas gravitatorias o intensidades sísmicas considerablemente inferiores a las cargas de las construcciones modernas. Asimismo, Arriaga et al. (2011) añade que, generalmente, las uniones carpinteras no son capaces de resistir una inversión de esfuerzos y la mayoría están pensadas para transmitir esfuerzos a compresión. En la misma línea, Inat (2011) insisten en que la sollicitación en dirección perpendicular a las fibras es un factor limitante en el cálculo de las uniones, encuentros y elementos de sección variable.

Por otra parte, FSC España (2018) y González (2013) exponen que para garantizar un comportamiento seguro de las estructuras de entramado de madera ante cargas sísmicas u otro tipo de sobrecargas, se debe asegurar la ductilidad de las conexiones entre los elementos. La disipación de energía durante los terremotos no ocurre en los elementos de madera, sino más bien en las uniones de madera o de otro material. Por este motivo, tradicionalmente se opta por el uso de clavos, tornillos o pernos de un material dúctil como el acero, a modo de producir juntas capaces soportar fuerzas axiales, cortante y momentos flectores que se deformen elásticamente bajo condiciones de servicio, disipando energía y deformándose plásticamente en condiciones últimas de diseño, determinándose como conexiones semirrígidas (Arriaga et al., 2011; FSC España, 2018).

La unión tipo espiga es una de las juntas carpinteras más utilizadas en inmuebles históricos, y de acuerdo con Dai et al. (2022) es la junta principal en antiguos edificios y estructuras de madera chinos. Parisi & Piazza (2000) aseveran que las uniones de espiga tienen rigideces bajas que pueden provocar el fallo prematuro de una pieza o de toda la estructura debido a los grandes desplazamientos que se pueden producir en la unión. Por el contrario, Xue et al. (2020) afirma que las uniones de espiga recta y media espiga con sección transversal cuadrada tendrían buena capacidad de flexión



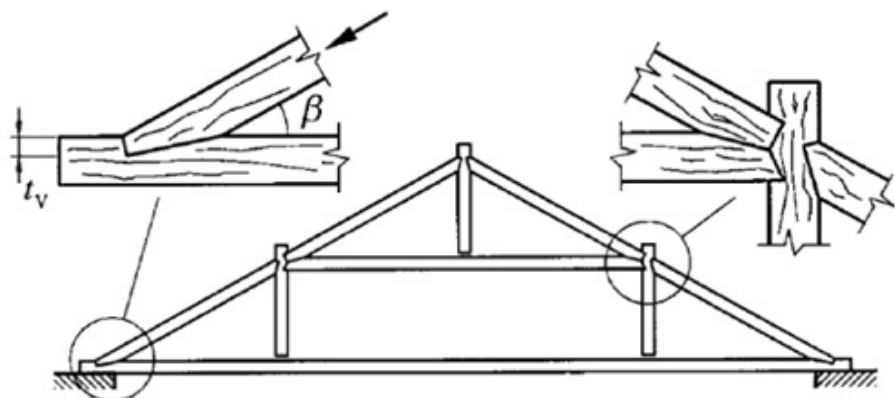
**Fig. 26**  
Construcción de una unión caja y espiga con daños post terremoto, espiga arrancada de la caja. (Zhou & Yan, 2015).

y resistencia al cizallamiento, argumentando que, a mayor sección transversal de la espiga, mayor es la capacidad de flexión. De esta forma, la espiga pasante tendrá mayor resistencia a flexión y al cizallamiento que la unión a media espiga. Por otra parte, Wu et al. (2019) explica que el rendimiento mecánico de las estructuras de madera con uniones caja y espiga puede mejorarse si la tensión y el esfuerzo perpendicular a la fibra se reducen mediante un refuerzo adecuado para la junta carpintera. Finalmente, los estudios más recientes de Li et al., (2021) y Xue et al., (2021) concluyen que a medida que aumenta la rotación en la unión, la capacidad de flexión, rigidez y disipación de energía disminuye en la junta no reforzada.

De acuerdo con Arriaga et al. (2011), en las uniones de caja y espiga que sirven para apoyar vigas o viguetas sobre pilares la transmisión de carga o reacción en el apoyo producirá un esfuerzo cortante en la espiga y compresión perpendicular a la fibra. Feio et al., (2014) explica que la evidencia de diversas investigaciones ha revelado que la mayoría de los daños estructurales en edificios de madera conectados mediante uniones de caja y espiga surgieron principalmente por holgura, deformación y tirones de la espiga (Figura 26). Estos problemas hacen que toda la estructura se incline o incluso colapse. Zhou & Yan (2015) argumentan que, durante los terremotos, la fricción provocada entre la caja y la espiga produce disipación de energía. No obstante, la espiga puede salirse de la caja debilitando la conexión entre elementos y propiciado la inestabilidad de la estructura. Además, explican que la fricción tiene relación directa con la distancia de deslizamiento relativo y la compresión entre la espiga y la caja.

La configuración de la unión carpintera del tipo embarbillado a menudo varía en función de los tipos de elementos estructurales que conecta. No obstante, existen diversos estudios que hablan de esta unión que se suele utilizar en estructura de techumbre de edificios históricos (Figura 27). Palma et al. (2010) explica que el funcionamiento de esta junta se basa en las fuerzas de compresión y fricción de la madera para mantener las superficies enfrentadas en estrecho contacto, utilizando en algunas ocasiones refuerzos metálicos. Parisi & Piazza (2000) añade que la capacidad portante de la unión ocurre en función del ángulo de inclinación, la profundidad de la muesca y la longitud de la puntera que ofrece resistencia al cizallamiento ante un empuje horizontal cuando esta se encuentra en un elemento cordonal, como lo es en el caso de las estructuras de techumbre.

A través de ensayos experimentales Palma et al. (2010) determinó que la apertura del ángulo de inclinación no tiene efectos en el comportamiento global de la junta, sin embargo, en el comportamiento al cerrar el ángulo de inclinación aumenta la profundidad de la muesca y, en consecuencia, una menor profundidad de la muesca induce una pérdida de equilibrio temprano,



**Fig. 27**  
Diagrama estructura de tejado de madera edificio histórico, con detalle de dos diferentes tipos de unión embarbillado. (Parisi & Piazza, 2000).

desacoplando las piezas. Por otro lado, Parisi & Piazza (2000) a partir de ensayos experimentales monotónicos de carga lateral a uniones de tipo embarbillado, concluyeron que existen múltiples modos de colapso. Desde los resultados observaron que la unión que tenía una inclinación de 30° en rotación positiva colapsó en corte paralelo a la fibra longitudinal en la punta del elemento de madera. En ángulo de 60°, el colapso se produjo cuando los elementos se separaron; la rotación combinada con la limitada profundidad de la muesca de la unión hizo que el cabrío se separar de su asiento.

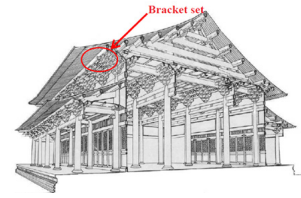


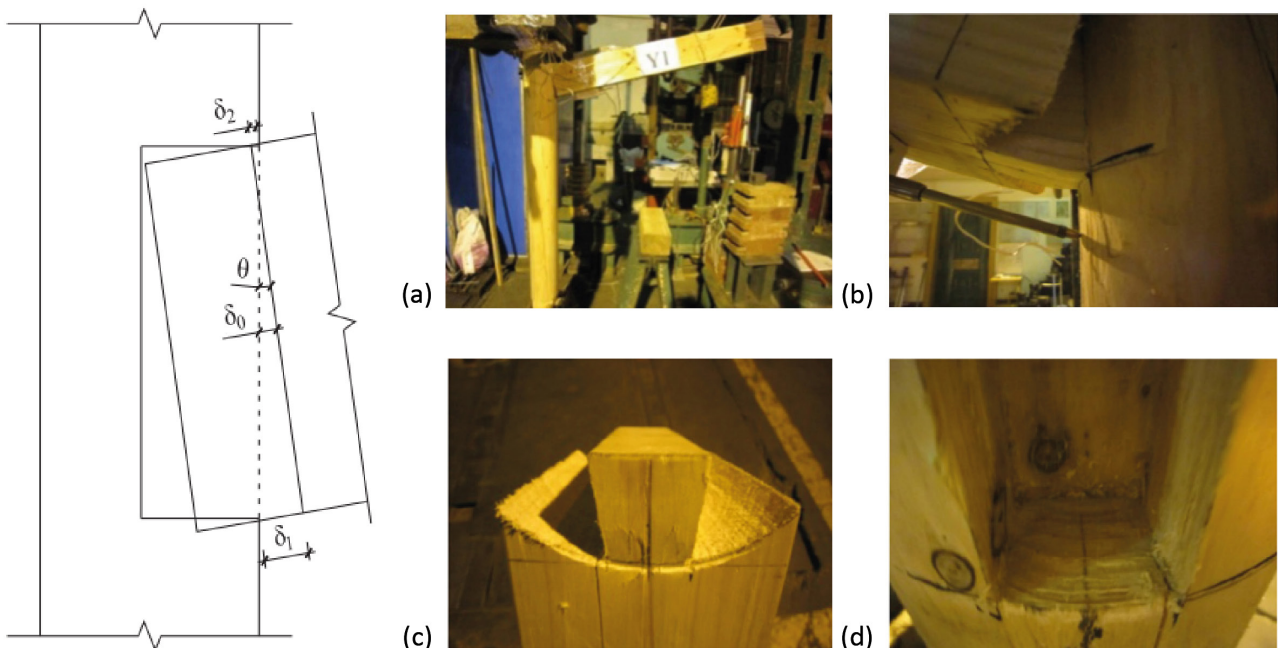
Fig. 28 Diagrama arquitectura de madera antigua china. (Zhao et al., 2019).

La junta tipo cola de milano es generalmente utilizada para unir elementos en las estructuras de entramado de madera tipo nave, típicas de la arquitectura antigua china (Figura 28). Chen et al. (2016) explica que el comportamiento carga-deformación de las uniones tipo cola de milano es complejo, y que la rigidez y resistencia rotacional desempeñan un papel importante en la rigidez lateral, la integridad y la estabilidad de toda la estructura.

A partir de los resultados de diversos ensayos experimentales bajo cargas monotónicas y análisis numérico sobre la unión tipo cola de milano, Chen et al. (2016) explican que las uniones primero experimentaron movimientos de compresión y deslizamiento entre ambas partes de la cola de milano, y que, posteriormente, ocurre el aplastamiento de las fibras de la madera a medida que aumenta la deformación por rotación (Figura 29). El ensayo permitió entender la deformación general que se produjo en la unión (Figura 29a), caracterizada por una abolladura en la parte inferior del ápice de la espiga (Figura 29b), una abolladura pronunciada en la parte superior de la espiga (Figura 29c) y una ligera expansión en la parte inferior de la caja (Figura 29d). Finalmente, Chen et al. (2016) concluye que el principal modo de fallo de las uniones colas de milanos en los experimentos ha sido la extracción de la cola.

Finalmente, podemos concluir que las uniones carpinteras cumplen un rol fundamental dentro del entramado de madera, siendo las principales disipadoras de energía durante un sismo, lo cual las vuelve vulnerables a diferentes factores. Si bien existen diferentes tipos de ensambles, como las uniones carpinteras caja y espiga, embarbillado y cola de milano, que funcionan de manera diferente ante una carga lateral, el modo de fallo común es la extracción de la espiga o separación de ambos elementos, lo cual se traduce a una pérdida de capacidad de la unión.

Fig. 29 Deformación característica de la espiga con respecto a la caja y sus modos de fallos: (a) rotación; (b) extracción; (c) fractura en el cuello de la espiga; (d) fractura en el cuello de la mortaja. (Chen et al., 2016).



### 1.3 PRINCIPALES CAUSAS DE DETERIORO DE LAS ESTRUCTURAS DE MADERA

La palabra “patología” nace de su raíz griega “pathos” y “logos”, definido como el estudio de las enfermedades en términos generales. En cuanto a lo que refiere a la patología constructiva de la edificación, Monjo (1999) la describe como la ciencia que estudia los problemas constructivos que aparecen en las edificaciones o en alguno de sus componentes estructurales o no estructurales posterior a su ejecución. Los procesos patológicos pueden afectar en diferentes fases del ciclo de una construcción, ya sea en su etapa inicial, en la construcción, durante su funcionamiento o a lo largo de su vida útil. La mayoría de las patologías se presentan en tres fases; el origen, la evolución y finalmente el resultado. Las lesiones son la manifestación final de un proceso patológico y se pueden dividir en tres grandes familias en función del carácter y la tipología de su proceso, categorizándose en físicas, químicas y mecánicas (Broto, 2006).

Según Broto (2006), las lesiones físicas corresponden a problemáticas patológicas asociadas a fenómenos físicos como heladas, condensación u otro, siendo más habitual encontrar en las edificaciones humedad, suciedad y erosión. Por otro lado, las lesiones mecánicas son relacionadas a los daños producidos por movimientos telúricos o sobrecargas en algún elemento estructural del inmueble, pudiendo las lesiones clasificarse en deformaciones, grietas, fisuras, desprendimiento, y erosión mecánica. Finalmente, las lesiones químicas son consecuencia de reacciones químicas en los materiales de los elementos constructivos producto de fenómenos atmosféricos, contaminantes del ambiente, acción de algunos organismos vivos, presencia de sales, ácidos o álcalis, que reaccionan químicamente y acaban produciendo algún tipo de descomposición material, las más comunes corresponden a eflorescencia, oxidación y corrosión.

En particular, la vida útil de la madera se ve limitada por la “durabilidad natural”, es decir, la capacidad que posee de resistir los ataques de agentes degradadores, como los hongos, bacterias, insectos u otros. Esta característica incide en la cantidad de tiempo en que se mantendrán vigentes las propiedades físicas y mecánicas de la madera (Cuadrado et al., 2017; De la Cruz et al., 2018). Hernández (2019) explica que las patologías presentes en este material se producen por la descomposición de las fibras de la madera debido a cambios bruscos en factores como la humedad y la temperatura. Por otro lado, Lasheras (2009) argumenta que los principales problemas patológicos en las estructuras de madera se deben a una deficiencia a nivel material, siendo las lesiones mecánicas una de las más comunes.

Autores como Broto (2006), Bustos (2023) y Lasheras (2009) declaran que los agentes patológicos pueden aparecer desde que el árbol es talado hasta que es puesto en obra, generando una división en dos grandes grupos de acuerdo con las causas de los procesos patológicos y basados en el momento en el que son adquiridas por el material: causas congénitas y causas adquiridas. Las causas congénitas corresponden a factores exclusivos del material, derivados de la composición física-química de la madera y aparecen antes de que la madera sea utilizada en obra, son directas y se relacionan con procesos de plantación, extracción y manipulación del elemento. En cambio, las causas adquiridas son las amenazas que afectan al material cuando este se encuentra en obra cumpliendo su función. En este grupo se encuentran dos subcategorías conocidas como causas por agentes abióticos o fisicoquímicos, y causas por agentes biótico o biológicos. EL presente apartado intenta contextualizar, de manera general, cuáles son las patologías y agentes patológicos existentes que afectan más comúnmente a las estructuras de entramado de madera,

dando énfasis al daño que estas pueden generar en la zona de las uniones carpinteras.

### 1.3.1 AGENTES ABIÓTICOS O FISICOQUÍMICOS

Los agentes patológicos abióticos o fisicoquímicos son lesiones físicas y/o químicas con origen en factores medioambientales, climáticos o meteorológicos como consecuencia de la exposición a la intemperie y a factores como la luz, el viento y el agua, el fuego y los sismos. Estos factores producen alteraciones en la madera ocasionando deformaciones desplazamientos, revirados, fendas, hinchamientos o combustión del material (Broto, 2006; Bustos, 2023; Lasheras, 2001, 2009). Hernández (2019) explica que los agentes pueden acelerar el daño y la degradación del material, generando el oscurecimiento, agrietamiento, o crecimiento de mohos, como primer síntoma de deterioro debido a efectos ambientales. La Tabla 1 muestra un resumen de dichas categorías que afecten a las uniones carpinteras, las cuales serán explicadas en profundidad en la presente sección

### 1.3.2 HUMEDAD ATMOSFÉRICA

Otro agente patológico medioambiental que afecta a la madera es la humedad atmosférica. La madera es un material higroscópico con la capacidad de captar la humedad del aire. Esta característica permite que el material sea capaz de absorber agua provocando el hinchamiento de las piezas madereras en climas húmedos-lluviosos y su contracción en climas secos. El deterioro de la madera producido por la humedad ocurre debido a los reiterados cambios en las dimensiones superficiales de los elementos expuestos a la intemperie. La contracción y dilatación del material conducen a la aparición de fendas y alabeos, logrando llegar a la desintegración mecánica de las capas superficiales de la pieza y dando lugar a filtraciones de los extractos tóxicos y de los protectores de la madera, reduciendo así su resistencia a la degradación. (Broto, 2006; CORMA, 2008; Turbi, 2015).

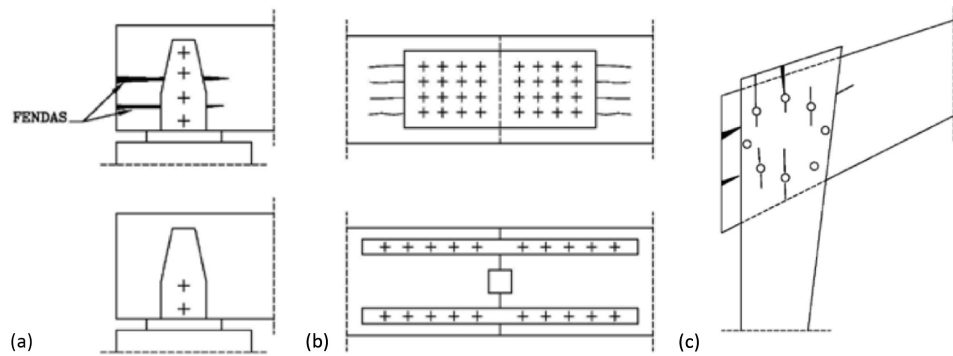
Generalmente, las uniones de madera que poseen herrajes metálicos presentan lesiones producto de la hinchazón y la merma, causadas por cambios en el contenido de humedad y el impedimento al libre movimiento de la madera, provocando fendas o fisuras cuando la madera pierde humedad. Arriaga et al. (2011) menciona tres casos de unión con herraje y las lesiones producidas respecto a la posición de la fijación. El primer caso, un apoyo de viga con restricciones del movimiento en todo su canto, la solución corresponde mover las fijaciones a la zona inferior (ver Figura 30a). El segundo caso, un empalme rígido entre dos piezas de madera con chapas metálicas que impiden su contracción, la solución corresponde al uso

Tab. 1  
Resumen patologías producidas por agentes abióticos o fisicoquímicos.

Nombre del agente patológico		Signos de la lesión
Humedad atmosférica	Contracción y dilatación	Fisuras y alabeos
Fuego	Carbonización	Cambio de color de la madera a negro
Daño mecánico	Carga y sobrecarga	Agrietamiento
		Separación de las uniones carpinteras
		Rotura

Fig. 30

Fendas en las uniones debidos a la merma de la madera: (a) caso de un apoyo de viga con restricciones del movimiento en todo su canto; (b) empalme rígido entre dos piezas de madera con placas metálicas; (c) nudo de esquina. (Arriaga et al., 2011).



de herrajes metálicos independientes para transmitir la flexión (ver Figura 30b). El tercer caso, corresponde al nudo de esquina el cual presenta fendado cuando las dimensiones de los elementos son grandes (ver Figura 30c). Finalmente, Arriaga et al. (2011) menciona que en cierta disposición de los elementos se puede ocasionar tracción perpendicular a la fibra, lo cual podría limitar la capacidad de la unión.

### 1.3.3 FUEGO

La madera es un elemento altamente combustible, pero parcialmente resistente al fuego. Barreiro & Hirsch (2011) y Hernández (2019) señalan que el fuego es un agente de alto riesgo para las estructuras de madera, el cual puede ser originado por diversas causas, siendo las principales el fallo en las instalaciones eléctricas y descuidos humanos. Sin embargo, la madera actúa en un principio como aislante térmico, deteniendo y estabilizando la combustión, carbonizando en el exterior los elementos, pero retardando que llegue al interior. Este fenómeno hace que las piezas de madera logren conservar por más tiempo sus propiedades mecánicas en el interior, y qué, en caso de propagarse el fuego, la evacuación de la estructura pueda realizarse antes de que esta llegue a un estado de colapso parcial o total. Liotta (2000) explica que las uniones constituyen un punto débil dentro de las estructuras de entramado de madera en caso de incendio, ya que la mayor profundidad de carbonización se dará en los ensambles entre las piezas debido a que las juntas existentes facilitan la penetración del fuego, ya sea por las formas en su configuración o por el uso en algunas ocasiones de elementos metálico que funcionan como conductor de calor hacia el interior de la madera.

### 1.3.4 DAÑO MECÁNICO

El daño mecánico de las estructuras de madera se asocia principalmente con las deformaciones excesivas que pueden sufrir los elementos estructurales debido a diversas causas o agentes del deterioro. Uno de ellos son los sismos. En general, es sabido que las estructuras de entramado de madera presentan un buen comportamiento sísmico, condición que se asocia, principalmente, a la ligereza de las estructuras, resistencia del material, geometría regular de las edificaciones, y ductilidad de sus uniones. Sin embargo, esto no las deja exentas al deterioro debido a causas relacionadas con la pérdida de estabilidad y resistencia de sus elementos estructurales. De acuerdo con Lasheras (2009), los sistemas estructurales en edificaciones antiguas en general podrían estar sobredimensionados para sus necesidades resistentes, pero infra dimensionados para las de rigidez.

En la mayoría de los casos, los fallos se manifiestan posterior a la fase de construcción, tras el uso y la aplicación de cargas externas en la edificación. En algunas excepciones las estructuras se encuentran diseñadas de manera insuficiente para ser sometidas a cargas de larga duración, por lo que se presentan deformaciones que paulatinamente comienzan a exagerarse, llegando a inducir una rotura en la estructura con el paso del tiempo. Lasheras (2001) menciona tres tipos fallos comunes en este tipo de estructuras, el primero es el aplastamiento transversal de los elementos comprimidos en dirección perpendicular a la fibra, fenómeno que se produce comúnmente en las soleras bajo los pies derechos, donde ocurre el aplastamiento del elemento producto de la compresión que ejerce el elemento vertical, generando grietas de corte en la madera, tal como se observa en la Figura 31. En segundo lugar, la deformabilidad global y falta de rigidez estructural, producto de la inherente articulación de los nudos estructurales. Finalmente, las deformaciones propias de un edificio con muchos años de vida, lo que implica la deformación de paredes y suelos con el paso del tiempo, perdiendo su horizontalidad y verticalidad, respectivamente.

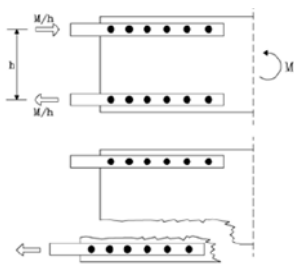


Fig. 31  
Fotografía aplastamiento de solera inferior. (Lasheras, 2009).

Por otro lado, Liotta (2000) reconoce cinco patologías relacionadas con la pérdida de la resistencia y estabilidad de los sistemas constructivos de entramado de madera. La primera relacionada con la deformación por el uso de una sección insuficiente de los elementos estructurales, lo que puede provocar una deformación excesiva de los mismos, tal como sucede en el caso de las vigas, donde muchas veces las flechas de deformación se vuelven evidentes a simple vista a medida que el elemento se somete a una sobrecarga por un largo periodo. La segunda causa son las deformaciones elevadas debidas al efecto de la fluencia en piezas colocadas en verde que pueden llegar a una posible rotura. En tercer lugar, los fallos en las uniones debido a un dimensionado insuficiente o un diseño incorrecto y posible incremento de la deformación. En cuarto lugar, las roturas en piezas determinadas por defectos locales. Finalmente, la falta de arriostramiento adecuado puede dar lugar a la pérdida de la verticalidad de las estructuras de muro, lo que, a su vez, podría generar tensiones no deseadas en ciertas uniones, aumentando el riesgo de separación entre elementos.

Las uniones carpinteras presentes en inmuebles históricos pueden llegar a constituir puntos críticos dentro de las estructuras de entramado de madera, ya que, generalmente, sufren el deterioro del material y otros fenómenos asociados a la deformación, holgura, y el arrancamiento de las piezas. Dai et al. (2022) menciona que el arrancamiento ocurre principalmente en uniones que posean espiga, tal como los ensambles cola de milano, caja y espiga, como se muestra en la Figura 26. Ma et al. (2020) manifiesta que los daños estructurales afectan significativamente las capacidades de flexión, rigidez y disipación de energía de las juntas. Por otro lado, Yu et al. (2022) añade que la contracción y la deformación por tracción de una junta de espiga provoca la degradación de las propiedades mecánicas de la unión, lo que finalmente conducirá a una posible destrucción de la estructura completa. Asimismo, Palma et al. (2010) argumenta que la pérdida de contacto entre las superficies de los elementos provoca daños y la pérdida de la resistencia y rigidez de la unión. Otros autores como Branco & Descamps (2015) distinguen la rotura como un modo de fallo común en la madera, sobre todo en las uniones carpinteras producto de las cargas en tensión.

Por otro lado, Arriaga et al. (2011) menciona que como consecuencia del aplastamiento de la madera sometida a compresiones locales elevadas se produce el deslizamiento de las uniones, situación que comúnmente ocurre cuando existen cambios de uso en las edificaciones históricas, viéndose expuestas a mayores solicitaciones de carga. Arriaga et al. (2011) también



**Fig. 32**  
Diagrama desgarramiento en una unión de empalme rígido con elementos concentrados en línea. (Arriaga et al., 2011).

señala el daño por desgarramiento de un trozo de la pieza que se producen debido a presencia de elementos de fijación en la madera. El autor también señala que estos daños se pueden evitar asegurando la disposición de los elementos externos, por ejemplo, evitando disponerlos en una línea o en

### 1.3.5 AGENTES BIÓTICOS O BIOLÓGICOS

Los agentes bióticos o biológicos son organismos vivos que habitan en la madera, utilizando el material como morada o alimento, degradando el material y sus propiedades mecánicas. Los organismos más comúnmente se denominan xilófagos. No obstante, existen otros tales como hongos, bacterias, roedores, insectos, moluscos y crustáceos (Broto, 2006; Bustos, 2023; Lasheras, 2001). Este tipo de agentes dependen de condiciones externas como la fuente de alimento, temperatura y la humedad para lograr desarrollarse y subsistir en la madera (CORMA, 2008).

Cabe mencionar que no todos los agentes bióticos o biológicos causan daños estructurales, y algunos solo producen daños superficiales. Aunque si estos últimos perduran en el tiempo, podrían permitir la coexistencia de otros agentes que si causen daños estructurales en la madera. Este apartado, y tal como resume la Tabla 2, se enfoca únicamente en aquellos agentes que afectan las propiedades mecánicas de la madera y, por consiguiente, de las uniones carpinteras.

Los insectos que atacan la madera trabajada, utilizándola como morada para reproducirse, vivir y alimentarse, a menudo se convierten en un problema para las estructuras de entramado. Esto se debe a que atacan la madera de manera exponencial, sin hacer distinciones entre elementos o uniones carpinteras, como se observa en la Figura 30a, quedando la estructura completa vulnerable a sus ataques. Según explica Broto (2006) las especies más agresivas corresponden a los insectos conocidos como coleópteros y los isópteros. No obstante, el daño causado por ambas especies ocurre de manera silenciosa, siendo difícil de detectar a simple vista, debido a que la actividad de excavación y la residencia de las colonias se produce en las profundidades de la madera, quedando solo el rastro de excremento de la Figura 30b, similar al aserrín (Bustos, 2023; Ripa et al., 2004).

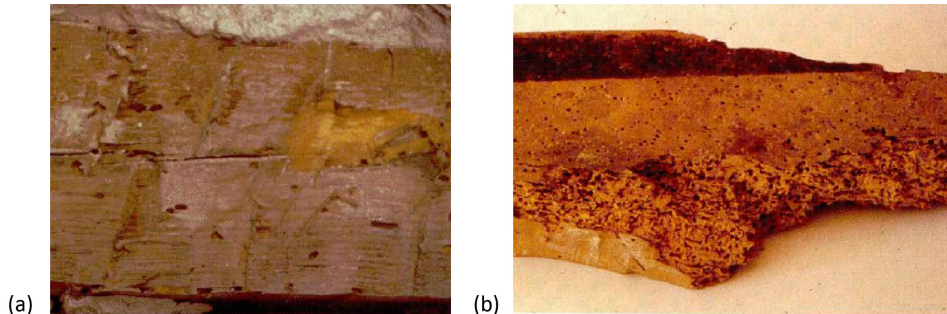
Los insectos que atacan la madera trabajada, utilizándola como morada para reproducirse, vivir y alimentarse, a menudo se convierten en un problema para las estructuras de entramado. Esto se debe a que atacan la madera de manera exponencial, sin hacer distinciones entre elementos o uniones carpinteras, como se observa en la Figura 33a, quedando la estructura completa vulnerable a sus ataques. Según explica Broto (2006) las especies más agresivas corresponden a los insectos conocidos como coleópteros y los isópteros. No obstante, el daño causado por ambas especies ocurre de manera

**Tab. 2**  
Resumen patologías producidas por agentes bióticos o biológicos.

Nombre del agente patológico		Alimento	Signos de la lesión
Coleópteros o escarabajos	Carcoma	Sustancias nutritivas de la madera	Desprendimiento de polvo
			Agujeros perforados desde el interior de la madera hasta el exterior
Isóptero	Termita	Celulosa	Galerías longitudinales a la fibra



**Fig. 33**  
Fotografías de daños por agentes biológicos: (a) Unión entre pilar y viga eliminada por termitas (Jimeno, 2015); (b) Acumulación de fecas de isóptero expulsada de las galerías. (Ripa et al., 2004).

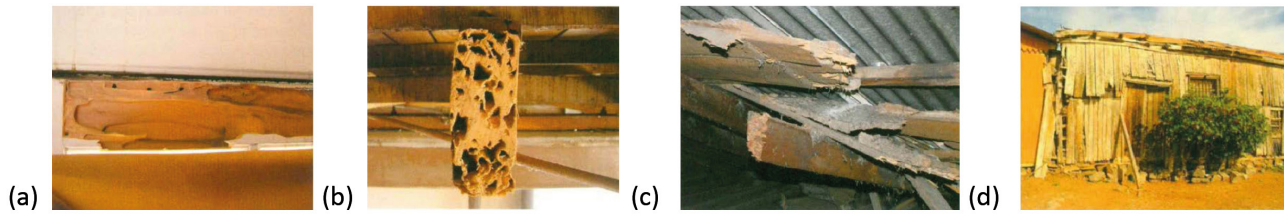


**Fig. 34**  
Fotografías de daños producidos por coleópteros: (a) Carcoma o anóbidos; (b) Cerambícidos o algavaros. (Arriaga et al., 2002)

silenciosa, siendo difícil de detectar a simple vista, debido a que la actividad de excavación y la residencia de las colonias se produce en las profundidades de la madera, quedando solo el rastro de excremento de la Figura 33b, similar al aserrín (Bustos, 2023; Ripa et al., 2004).

Los coleópteros o escarabajos son insectos que se alimentan de las sustancias nutritivas de la madera en servicio. Bustos (2023) dice que, si bien existen diversos tipos de familias de este insecto, la especie que generalmente habita en los elementos de madera en obras corresponde a las carcomas. Sánchez & Díaz (2017) añaden que los coleópteros son insectos que tienden a atacar maderas más antiguas, secas y con mayor humedad. Estos ataques se manifiestan mediante síntomas como pequeños orificios, aserrín en el interior y alrededores, así como por el hinchamiento superficial que generan las galerías de sección circular y ovalada en el interior de la madera. Estas galerías están separadas entre sí por una fina capa de madera (ver Figura 34). Según lo establecido por Ripa et al. (2004) en su libro “Termitas y otros insectos xilófagos en Chile”, se identifican siete familias de coleópteros xilófagos en el país, las cuales atacan la madera en diversos estados. Ripa et al. (2004) afirma que las familias conocidas como Anobidae, Lyctidae, Bostrichidae y Curculionidae son las principales familias de coleópteros xilófagos presentes en las maderas en servicio en el país (ver Anexo 1).

Los isópteros son un tipo de termita que se caracterizan por ser insectos sociales, similares a las hormigas, que viven bajo una organización social avanzada. Son incapaces de vivir de forma solitaria y forman colonias con miles de individuos alrededor de una reina dedicada a producir huevos. Sánchez & Díaz (2017) argumentan que, en general, los isópteros se alimentan de la celulosa y viven bajo tierra, donde encuentran la humedad y temperatura adecuadas para sobrevivir. Desde el nido, crean galerías para alcanzar la madera, en la cual producen galerías longitudinales paralelas a la fibra, con secciones de 1 a 2 cm, dejando una fina capa de madera exterior que dificulta su detección desde el exterior. La intensidad del ataque puede aumentar a medida que se asciende en la estructura, llegando a ser tan grave que suele causar colapsos parciales en las edificaciones, como desprendimientos de vigas, balcones, ornamentos exteriores, entre otros (ver Figura 35). Ripa et al. (2004) explica que en Chile existen diferentes especies de termitas, donde solo cuatro de ellas conocidas como: *Reticulitermes flavipes*, *Cryptotermes brevis*, *Neotermes chilensis* y *Porotermes quadricollis*, representan un peligro con impacto económico relacionado al daño que causan en viviendas, muebles y árboles (Ver Anexo 2).

**Fig. 35**

Fotografías de daños producidos por Isópteros: (a) viga de roble dañada por *C. brevis*; (b) Galerías de *C. brevis* en madera de roble); (c) vigas entretecho con daño por *C. brevis*, Valparaíso. V región; (d) Vivienda atacada por *C. brevis*, Alcones, III Región. (Ripa et al., 2004).

## 1.4 SOLUCIONES DE REFORZAMIENTO DE UNIONES CARPINTERAS: REVISIONES TÉCNICAS TRADICIONALES DE VANGUARDIA

Muchas ciudades alrededor del mundo conservan de manera íntegra edificios tradicionales y estructuras de entramado de madera centenarias, tales como los edificios Pombalino en Portugal (Poletti 2013), las casas Baraccata en Italia (Dhandapany & Menon, 2019), los edificios de quincha en Perú (Torrealva et al., 2018), y las de tabique-adobillo en Valparaíso (M. Jiménez, 2014; Jorquera, 2014), entre otros. No obstante, el carácter longevo de los edificios no es necesariamente un indicador de que estas edificaciones posean la capacidad portante suficiente para soportar nuevas cargas impuestas o resistir a nuevos terremotos. Y, aunque las uniones carpinteras son el resultado de un proceso evolutivo de prueba y error que refleja el alto nivel de artesanía y comprensión estructural de los maestros carpinteros del pasado (Branco & Descamps, 2015), no todas las juntas son capaces de soportar cargas adicionales, ni disipar la energía durante los sismos.

Los antiguos maestros carpinteros (previo a la revolución industrial entre el siglo XII y XVIII) observaban los puntos débiles y modos de fallo en estructuras en servicio, para diseñar reforzamientos y crear una segunda versión que fuera más resistente (Branco & Descamps, 2015). Un claro ejemplo de ello son los empalmes de embarbillado frontal con espiga, como una segunda versión de una junta de embarbillado frontal, ya que la inclinación de la muesca aumenta la capacidad de carga de la junta, tal como muestra la Figura 36. Posteriormente, a comienzos del siglo XIX, de manera escasa por efectos de la revolución industrial, se comenzaron a utilizar conectores metálicos, como pernos, remaches y estribos para reforzar las uniones carpinteras, y así evitar la separación de las superficies (Jiménez, 2014). No obstante, no fue hasta el siglo XIX, con el avance de los métodos de producción industrial, que esta práctica se volvió más común, posibilitando el acceso a piezas metálicas de reforzamiento, lo que permitió una mayor robustez y resistencia de las juntas.

En la actualidad, los edificios tradicionales de entramado de madera suelen requerir ser intervenidos estructuralmente, debido, principalmente, al deterioro del armazón o al cambio en el uso de las edificaciones. En ambos casos, se puede ver afectada la capacidad de carga de las estructuras y, por lo tanto, requerir diseñar soluciones de reforzamiento para las uniones carpinteras. Las técnicas de reforzamiento buscan reestablecer y/o mejorar la resistencia de las juntas, y la selección del tipo de refuerzo dependerá del estado de conservación y de la necesidad de la estructura en particular. Por ejemplo, en la rehabilitación de una estructura en zonas sísmicas, el refuerzo buscará evitar la pérdida de la capacidad de la unión y la posible separación de las superficies de contacto debido a la disminución de las fuerzas de compresión para mantener el comportamiento de caja o monolítico (box behaviour) de la estructura (Parisi & Piazza, 2000).

La carta del ICOMOS (1999) titulada “Principios que deben regir la conservación de las estructuras históricas en madera” presenta una guía para

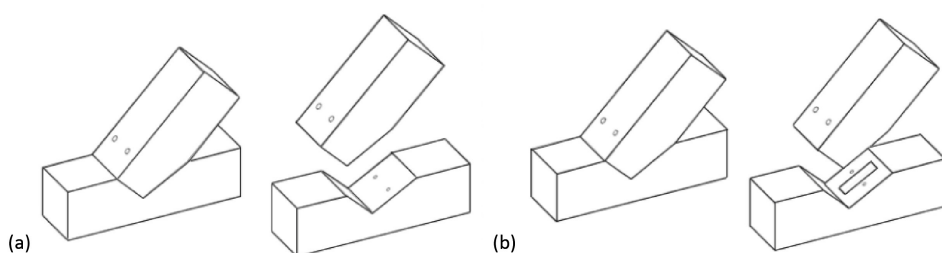


Fig. 36  
Diagrama unión carpintera: (a) embarbillado frontal (b) embarbillado frontal con caja y espiga. (Aslankaya, 2019).

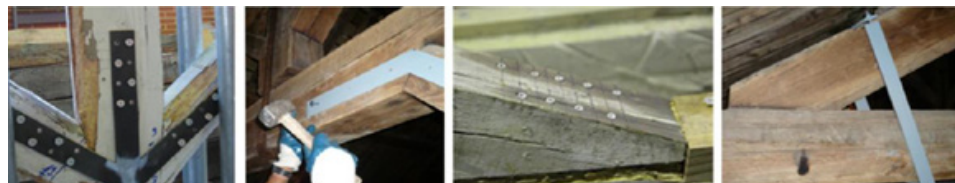
Fig. 37

Fotografías de ejemplos de uniones embarbillado con dispositivos metálicos antiguos. (Branco & Descamps, 2015).



Fig. 38

Fotografías de intervenciones contemporáneas de refuerzo que reproducen técnicas antiguas en uniones embarbillado. (Branco & Descamps, 2015).



la conservación y rehabilitación sostenible y respetuosa de las estructuras históricas de madera. Este documento resalta que en dichas tareas se deben tener en cuenta aspectos como el reconocimiento de la importancia de las estructuras de todas las épocas como parte del patrimonio cultural mundial, la gran variedad de estructuras con diferentes especies de madera, con diferentes propiedades y calidades, entre otros fundamentos. Asimismo, el documento señala que las intervenciones deben tener como objetivo prioritario la mantención de la autenticidad histórica y la integridad del patrimonio cultural. Por lo tanto, las intervenciones propuestas en este tipo de estructuras deberán tender a utilizar métodos y técnicas tradicionales, técnicamente removibles, en caso de ser posible, y no limitar la posibilidad de trabajos posteriores. En el caso de ser una reparación o sustitución se podrán utilizar piezas de madera que sustituyan a las deterioradas, respetando los valores históricos y estéticos del inmueble.

Gentile et al. (2002) señalan que la reparación y la rehabilitación de las estructuras de madera se están volviendo cada vez más importante debido al deterioro de los materiales y a la capacidad limitada para soportar los niveles de carga actuales en los diferentes sistemas constructivos. Por su parte, Buzón (1982) explica la necesidad de conocer a precisión la técnica utilizada, el comportamiento de los materiales y los daños más frecuentes por vicio o envejecimiento, con el objetivo de encontrar la metodología de rehabilitación más adecuada. En este contexto, Branco & Descamps (2015) dan cuenta de que, en el pasado, se solían emplear tirantes de unión, estribos y pernos en zonas sísmicas para prevenir la separación entre elementos conectados bajo cargas inversas (Figura 37). Además, Branco & Descamps (2015) añaden que, en la actualidad, las soluciones de refuerzo generalmente parecen replicar las antiguas técnicas, incluso cuando se incorporan nuevas formas de fijación, como tornillos y tornillos autorroscante (Figura 38). Sin embargo, es importante tener en cuenta que las intervenciones posteriores afectan a la rigidez de la junta, por lo tanto, es fundamental verificar el comportamiento de la unión con la solución de refuerzo.

Durante las últimas dos décadas ha aumentado la cantidad de investigaciones sobre temas relacionados al refuerzo de las uniones carpinteras para diferentes tipos de juntas. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se han centrado en el uso del refuerzo para uniones carpinteras utilizadas en estructuras de techumbres (como por ejemplo de la unión embarbillada frontal) o en uniones tipo caja y espiga (Branco & Descamps, 2015; Chen et al., 2016a; Palma et al., 2010; Parisi & Piazza, 2000). Shiratori et al. (2008) plantea que, si bien existen diversas investigaciones que han verificado el comportamiento de las estructuras de madera durante los

sismos, aún existe incertidumbre sobre las formas de colapso de algunas de estas uniones ante las nuevas exigencias del futuro debido a los sismos. La nueva pregunta que las investigaciones buscan responder es ¿cómo pueden mejorarse los sistemas estructurales de madera en los países sísmicos para satisfacer las necesidades futuras?

Las soluciones de refuerzo desarrolladas e implementadas en investigaciones teórico-experimentales en los últimos años se pueden clasificar de acuerdo con la materialidad utilizada en la solución o dispositivo. Una categoría común es aquella donde se emplean elementos metálicos, replicando en ocasiones antiguas soluciones de refuerzo e incorporando elementos que mejoren la capacidad de la unión; dentro de esta categoría se incluyen las soluciones que utilizan estribos, tirantes, pernos, tornillos autorroscante, abrazaderas y amortiguadores. En segundo lugar, se destacan los refuerzos que emplean láminas de polímeros reforzadas con fibras, ya sea de vidrio, carbono y otro tipo. Otras técnicas más innovadoras incluyen, por ejemplo, el uso refuerzos con bambú o aquellas que utilizan materiales de aleaciones con memoria de forma o shape memory alloy (Cardone et al., 2019; Huang & Chang, 2016; Xue et al., 2020).

#### **1.4.1 APROXIMACIONES EXPERIMENTALES PARA EL PROTOTIPADO DE SOLUCIONES DE REFOTZAMIENTO**

Las investigaciones teórico-experimentales sobre estructuras de entramado de madera suelen desarrollarse en campañas específicas para estudiar el comportamiento de las uniones de manera aislada y dentro del marco. La evaluación del comportamiento sísmico o ante cargas laterales de las uniones generalmente se realiza mediante ensayos de carga lateral, cíclicos o monotónicos, dentro de su plano estructural. Estos ensayos permiten determinar el comportamiento no lineal de las estructuras obteniendo la curva de capacidad (relación no lineal carga vs. desplazamiento) y los modos de fallo característicos que pueden llevar al colapso. Actualmente, existe diferentes estándares nacionales e internacionales que guían y norman la realización de este tipo de experimentos (EN 12512:2001/A1, 2005; ISO 16670, 2003).

Determinar el método más adecuado para reforzar una unión determinada no es una tarea fácil. Esto debido principalmente a la alta variabilidad tipológica de uniones carpinteras y soluciones estructurales existentes en las construcciones históricas alrededor del mundo. En este contexto, la implementación de métodos experimentales para el prototipado de soluciones de reforzamiento para uniones carpinteras tiene como objetivo determinar y comprender el comportamiento estructural de una junta en particular, así como el rol de cada una de las partes que la componen, para luego proponer una solución de refuerzo a medida. Los próximos apartados (2.5.2 – 2.5.5) apartados) buscan describir las diferentes soluciones de reforzamiento para uniones carpinteras a través de aproximaciones experimentales, clasificadas por tipologías.

#### **1.4.2 REFORZAMIENTO CON ELEMENTOS METÁLUCOS Y TÉCNICAS TRADICIONALES**

El ensamble de entalladura o embarbillado frontal es una unión comúnmente utilizada en las estructuras de techumbre (dintel y tirante). Diferentes autores han estudiado el comportamiento dicha unión a través de ensayos experimentales. Generalmente, este tipo de pruebas se realizan aplicando cargas laterales, monotónicas y cíclicas, a las uniones con y sin

refuerzos. En este tipo de estudios las soluciones clásicas de refuerzo utilizan pernos internos, estribos, tirantes de unión y abrazaderas (ver Figura 39). (Branco & Descamps, 2015; Palma et al., 2010; Parisi & Piazza, 2008).

Parisi (2000) estudió el comportamiento elástico y post elástico de la junta embarbillada para estructuras de cubierta en edificios históricos. En su investigación realizó ensayos experimentales de las uniones bajo cargas laterales, monotónicas y cíclicas, variando la geometría de las uniones utilizando ángulos de  $30^\circ$  y  $60^\circ$ . Por otro lado, Palma et al. (2010) llevo a cabo una campaña experimental sobre las uniones tradicionales en las riostra o diagonales, conocidas como embarbillado frontal con espiga, con el objetivo de evaluar el comportamiento rotacional de la conexión. En esta investigación incluyó un estudio paramétrico considerando algunas de las características más frecuentes de las estructuras de cubierta portuguesas, evaluando diferentes configuraciones geométricas de la unión con diferentes ángulos y contenidos de humedad. Finalmente, Branco (2015) condujo un estudio similar al de Palma (2010) y ensayó juntas de embarbillado frontal en ángulo de  $30$  y  $60$  grados, como aquellas existentes en cerchas de techumbres en construcciones históricas de entramado de madera.

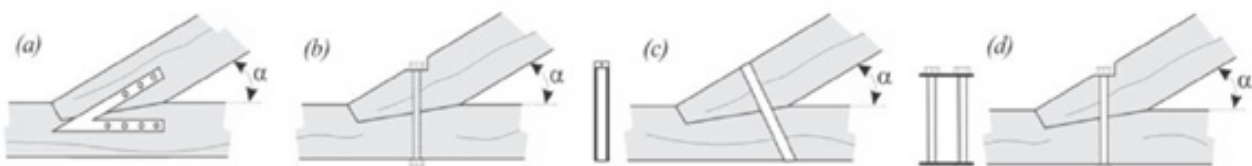
A continuación, se expondrán las observaciones de Branco & Descamps (2015); Palma et al. (2010); Parisi & Piazza (2008) luego de haber realizado ensayos experimentales en uniones embarbilladas con y sin reforzar.

Branco & Descamps (2015) sugieren que los tirantes de unión son la mejor solución de reforzamiento para en los embarbillados, ya que mejora la ductilidad para la carga negativa en los refuerzos de tirante. Por otro lado, Parisi & Piazza (2000), que también ensayaron especímenes reforzados con tirantes, añaden que cuando los tirantes se encontraron correctamente ajustado no se produjo la separación de las superficies de la conexión, lo que sugiere que esta solución requiere de mantenimiento. Parisi & Piazza (2000) observaron que cuando se refuerza la unión con un perno interno la madera se comprime a lo largo de las fibras por el perno y a través de ellas por la arandela, dando lugar a un comportamiento plástico permanente. No obstante, el perno permite que la unión mantenga su comportamiento básico mejorando su rendimiento post elástico. Branco & Descamps (2015) observa que el resultado de la solución con tirante y perno fueron similares.

Parisi & Piazza (2000) concluyeron que la solución de refuerzo que utiliza estribos metálicos permitió reducir el deslizamiento entre superficies de contacto sin de deformarse significativamente bajo la aplicación de la carga. Sin embargo, la capacidad de disipación de energía se vio reducida especialmente en ángulos de inclinación bajos. En su estudio, Palma et al. (2010) mencionan que, en la mayoría de la mayoría de las probetas con estribos, estos aumentaron tanto la resistencia como la rigidez de la unión, excepto al cerrar el ángulo de inclinación, cuando la unión carpintera presentaba un porcentaje del 12 % de humedad, lo cual condujo a un modo de fallo frágil. Mientras que, Branco & Descamps (2015) estipulan que en cuanto al reforzamiento para la unión de embarbillado frontal a  $60^\circ$ , se observó un aumento significativo de la ductilidad de la unión, mientras que para las cargas negativas el estribo metálico fue la técnica más eficaz.

Fig. 39

Diagrama reforzamiento de unión tipo elementos metálico utilizando: (a) estribos metálicos; (a) perno interno; (c) tirante de unión; (d) abrazadera. (Branco & Descamps, 2015).



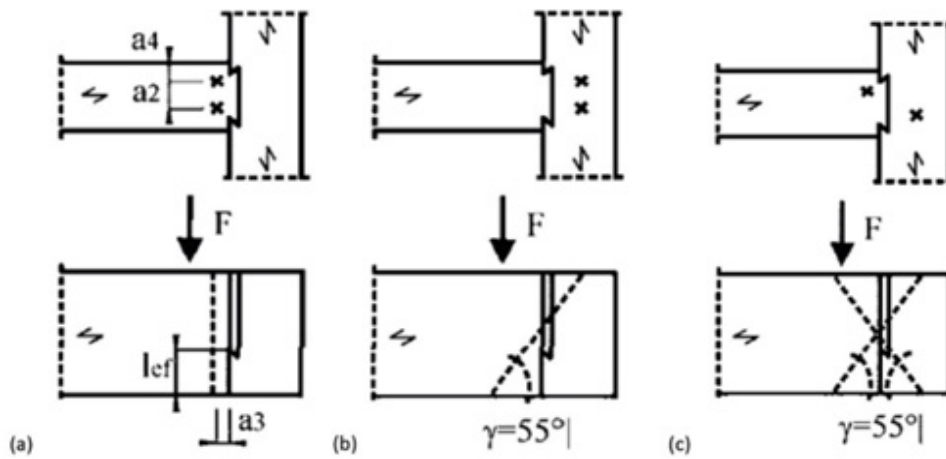


Fig.40

Diagrama reforzamiento de la unión tipo cola de milano redondeada utilizando: (a) tornillo autorroscante a 90°; (b) tornillo autorroscante a 55°; (c) tornillos autorroscantes cruzados. (Tannert & Lam, 2009).

Tannert (2009) propone el uso de tornillos autorroscante como refuerzo para mejorar el comportamiento estructural de las uniones tradicionales cola de milano redondeadas. En este estudio se dispusieron tornillos en ángulos de 90°, 55° y cruzados, como muestra la Figura 40. Las uniones reforzadas fueron sometidas a ensayos bajo cargas verticales de cizalladura y se obtuvo como resultado que, independientemente de la disposición del refuerzo (tornillo autorroscante), la capacidad de la conexión aumentó en comparación con las probetas no reforzadas. El mayor efecto del refuerzo se obtuvo cuando los tornillos estaban orientados en un ángulo de 55°, aumentando la capacidad de carga en un 50% en una serie y en un 100% en las otras dos series. En cambio, el refuerzo con tornillos en ángulo de 90° crea rigideces tan elevadas que el soporte de caja de la viga se aplasta.

Tannert (2016) volvió a estudiar diferentes propuestas de reforzamiento para uniones tipo cola de milano redondeadas implementando (i) el sobredimensionamiento de la pieza, (ii) el uso de tornillos autorroscante, (iii) el uso de adhesivo para con el fin de aumentar la rigidez de la junta, y (iv) la combinación de una capa de adhesivo y tornillo autorroscante. El autor ejecutó ensayos experimentales aplicando cargas verticales en las uniones construidas como modelos aislados a escala real. Los resultados obtenidos demostraron que el sobredimensionamiento de la espiga y el uso de tornillos autorroscante aumentaron significativamente la rigidez de la unión. Por otro lado, la solución con adhesivo de igual manera logró aumentar la rigidez, sin embargo, este aumento conlleva una reducción de la capacidad de deformación de la junta.

Poletti et al. (2015) realizó un estudio experimental con el objetivo de caracterizar estructural y sísmicamente el sistema constructivo de entramado de madera portugués conocido como Pombalino. En su investigación, además de analizar el marco completo, incluyó ensayos aislados de la unión a media madera ubicada en la base del marco (ver Figura 38), y propuso diversas soluciones de reparación y reforzamiento tanto para los marcos en la zona de las uniones, como para reparar las uniones aisladas luego de ser ensayadas ante cargas laterales. En el estudio de Poletti et al. (2015) las reparaciones de los marcos se focalizaron en las uniones ya que fue allí donde se produjeron la mayoría de los daños que provocaron su colapso. Tanto para reforzar los muros como las uniones aisladas, utilizó soluciones donde se incorporaron placas de acero con varillas, tornillos autorroscante y láminas de polímeros reforzados con fibra de vidrio, como se observa en la Figura 39.

En particular, el refuerzo que utilizó varillas de acero consideró la inserción de las barras en ambos elementos que componen la unión (viga y pilar), y además incluyó dos placas de acero conectadas con las varillas en

forma de cruz (ver Figura 41a). Los resultados de los ensayos de la unión con esta solución demostraron que la junta aumentó considerablemente su rigidez inicial y no presentó deformación en las barras. Sin embargo, debido a un problema técnico del equipo de carga, el ensayo no se terminó, por lo tanto, no existen resultados concluyentes. En el caso de los tornillos autorroscante, se insertaron dos en ángulos de 60° y 45°, atornillados desde la viga e interceptando la parte delantera del pilar (ver Figura 41b). Esta solución fue la menos invasiva, logrando incrementar 6 veces la resistencia y rigidez de la unión con respecto a la misma sin reforzar, sin mostrar un fallo frágil. Además, el resultado demostró un comportamiento de reblandecimiento posterior al clímax del ensayo, una vez la unión alcanzó su capacidad de carga máxima, generando una disipación importante de energía y un fallo dúctil. Por el contrario, luego de alcanzar su carga máxima, los tornillos fueron los responsables de la desfragmentación del grano de la madera, lo que provocó una deformación plástica de los tornillos.

Las láminas de polímeros reforzados con fibra de vidrio fueron utilizadas como un tejido unidireccional aplicado de manera vertical y horizontal para luego cubrir la junta completa con resina epoxi (ver Figura 42c). Los resultados obtenidos demostraron que la unión presentó una rigidez inicial muy elevada, alcanzando una resistencia 15 veces mayor que el espécimen no reforzado. Como conclusión, Poletti et al. (2015) argumenta que las soluciones más rígidas aumentaron la capacidad de disipación de las conexiones, siendo así la técnica más disipativa la solución con placas de acero, que logró aumentar 8 veces más la disipación de energía en la unión.

Zhou (2015) estudió el comportamiento sísmico de una unión china tipo caja y espiga (conectando una viga y un pilar) con diferentes tipos de reforzamiento. En este estudio se utilizó un prototipo de la estructura a escala 1:8 y diferentes métodos de reforzamientos, utilizando un gancho de hierro (Figura 43a), láminas de plástico reforzado con fibra de carbono

Fig. 41 Diagrama (a) marco de madera con detalles de conexiones adoptadas; (b) Junta a media madera. (Poletti, 2013).

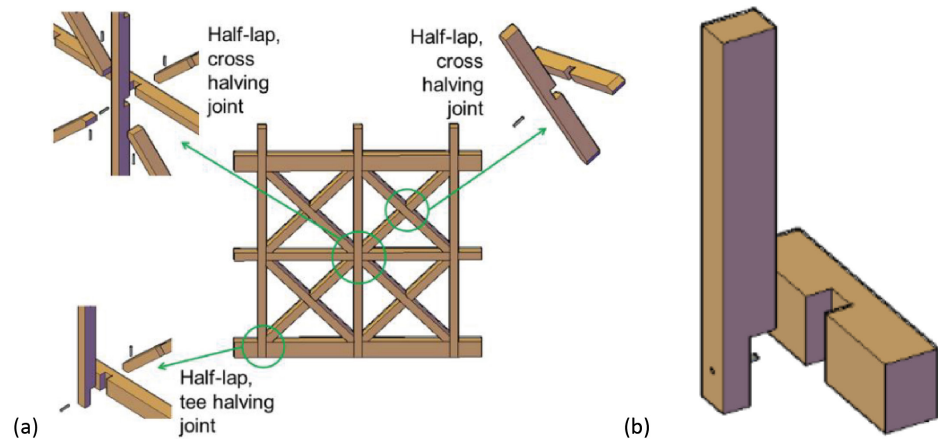
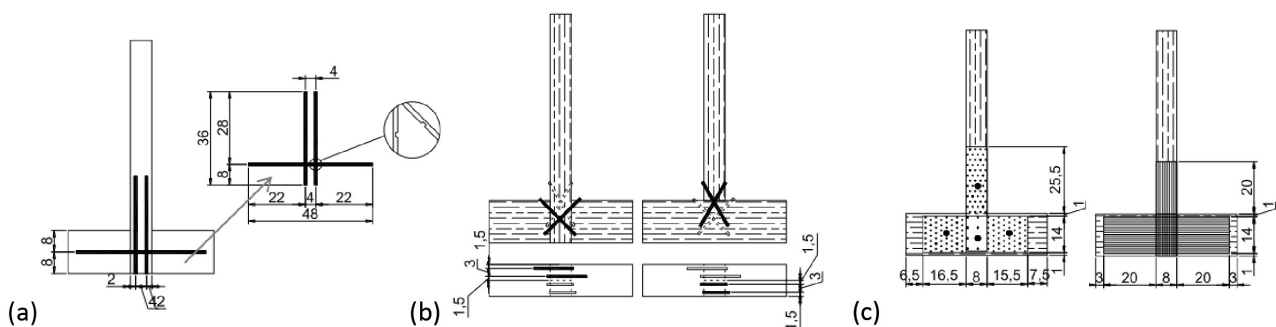


Fig. 42 Diagrama reforzamiento y reparación de las uniones a media madera utilizando: (a) placas de acero y varillas; (b) tornillos autorroscante; (c) láminas de polímeros reforzados con fibra de vidrio. (Poletti et al., 2015).



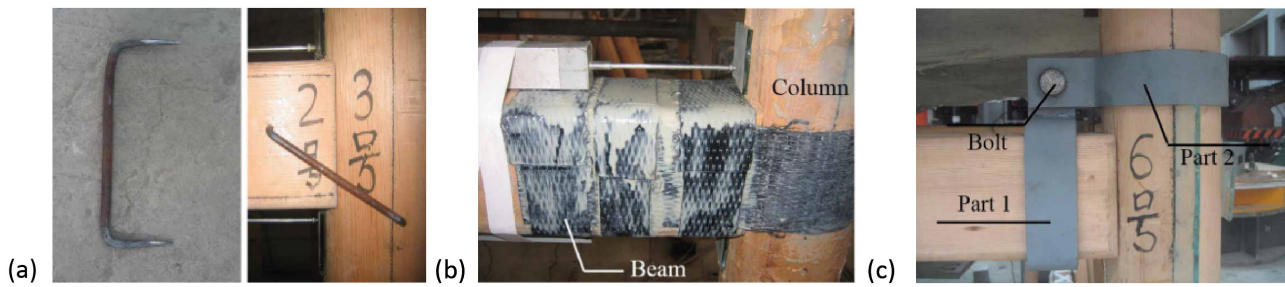


Fig.43 Fotografías soluciones de refuerzo: (a) gancho de hierro; (b) lámina de plástico reforzada con fibra de carbono (FRP); (c) abrazadera. (Zhou & Yan, 2015).

(GFRP) (Figura 43b) y una abrazadera de acero (Figura 43c). Para determinar la contribución de los reforzamientos y el comportamiento sísmico de las uniones se realizaron pruebas de carga cíclica inversa de baja intensidad mediante carga manual. De acuerdo con los resultados obtenidos por Zhou (2015), la unión reforzada con láminas de FRP, logró mejorar la capacidad de carga y la rigidez lateral de la unión. No obstante, su capacidad de disipación de energía fue baja. El refuerzo de gancho de hierro, dispuesto en cada extremo de la unión, presentó un buen rendimiento en cuanto a la disipación de energía y deformación, no obstante, su capacidad de carga y rigidez lateral no mejoraron notablemente. Por último, la abrazadera de acero que envolvió la unión mostro una capacidad de carga y rigidez lateral deficiente, pero una buena capacidad de disipación de energía y deformación.

### 1.4.3 REFORZAMIENTOS CON AMORTIGUADORES

En el trabajo de Yu et al., (2022) se propuso un método de refuerzo basado en un innovador sistema compuesto por un amortiguador metálico con acero Q235, como muestra la Figura 44, en uniones tipo caja y espiga características de las casas tradicionales de madera chinas conocidas como “Yikeyin”, en la zona de Tonghai. Yu et al. (2022) explica que los amortiguadores son dispositivos utilizados como solución de refuerzo en uniones carpinteras, proyectados con la finalidad de ayudar con la deformación angular de la sección aumentando la disipación de energía dentro de un rango de deformación limitado por el ángulo de desplazamiento entre pisos. Los ensayos realizados por Yu et al. (2022) bajo cargas repetidas de bajo ciclo, arrojaron como resultado, en comparación con las piezas sin reforzar, que el refuerzo ayudo a mejorar la rigidez de la unión, la capacidad de carga y la disipación de energía significativamente, además de aumentar el coeficiente de amortiguación de la junta y reducir los deslizamientos durante los procesos de carga, manteniendo en control la cantidad residual de la espiga.

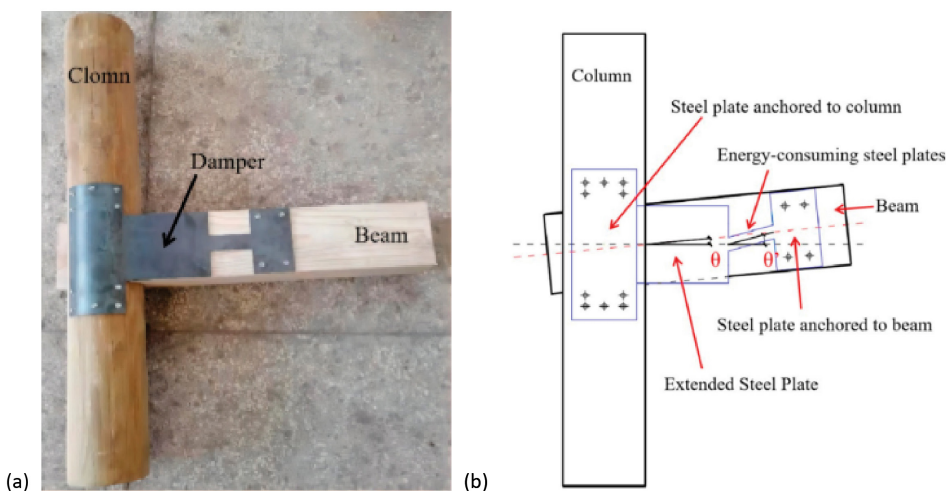
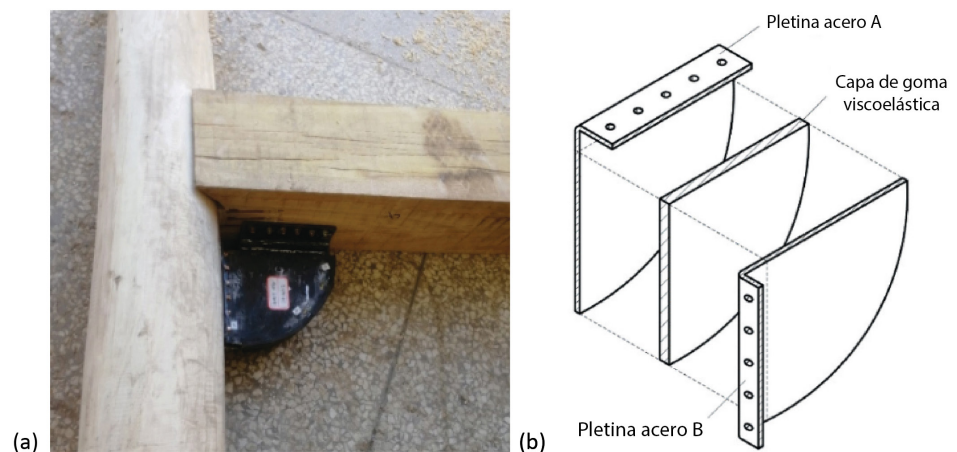


Fig.44 Amortiguador metálico. (Yu et al., 2022).

Otra solución de reforzamiento que incluye amortiguadores fue desarrollada por Dai et al., (2022). La Figura 45 muestra el dispositivo que se implementó para reforzar uniones del tipo cola de milano en soluciones de unión viga-pilar características de las estructuras tradicionales de madera chinas. El estudio consideró la ejecución de ensayos de carga repetida de bajo ciclo con el objetivo de encontrar una técnica de reforzamiento que evite la holgura, la deformación y el arrancamiento de la espiga en la unión. Los resultados mostraron que el amortiguador logra controlar la junta eficazmente, evitando el problema de separación o tracción de la espiga, mejora la disipación de energía, la resistencia y la rigidez rotacional. Finalmente, aumenta hasta 4 veces la capacidad portante de la estructura con el amortiguador en comparación de las uniones sometidas a ensayos sin refuerzos. Viscoelástica.

Fig. 45  
Amortiguador de cizalladura en forma de abanico. (Dai et al., 2022).



El estudio reciente de Xue et al. (2021) propone como refuerzo preventivo para uniones de caja y espiga en estructuras históricas de entramado de madera chinas un amortiguador con fricción de amplificación del desplazamiento para mejorar el comportamiento sísmico de la unión (ver Figura 46). Para verificar la efectividad de la solución, se ejecutaron ensayos pseudoestáticos en las uniones con y sin reforzamiento, obteniendo como resultado un aumento de 2,3 veces la capacidad de flexión de la unión reforzada en comparación a las uniones no reforzadas, el aumento de 4,5 veces el ángulo máximo de rotación de la junta y la mejora en la disipación de energía sin aumentar la rigidez. Xue et al., (2021) concluyó que cuanto menor sea la longitud de extracción de la espiga, mayor será la capacidad de carga y rigidez inicial, menor resistencia y degradación de la rigidez, y mayor la capacidad de disipación.

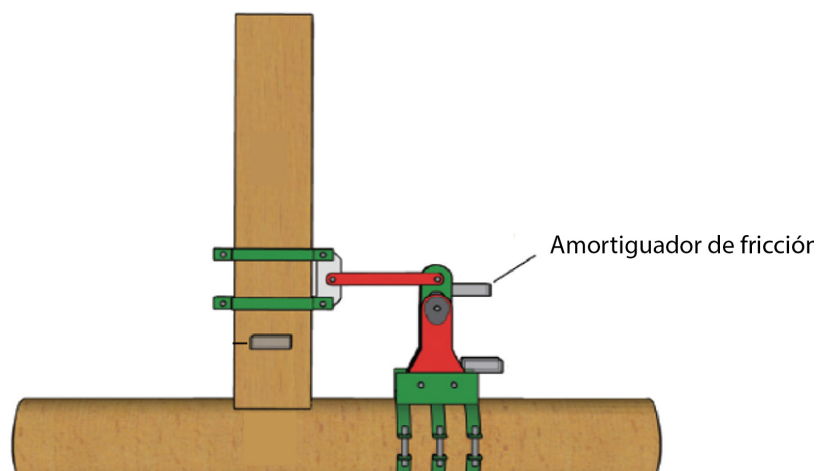


Fig. 46  
Amortiguador de fricción. (Xue et al., 2021).

### 1.4.4 REFORZAMIENTOS CON POLÍMEROS REFORZADOS

En los últimos años, diferentes investigadores han experimentado con el uso de polímeros reforzados con fibra de carbono o carbon fiber reinforced plastic (CFRP) para reforzar las uniones carpinteras (Aslankaya, 2019; H. Li et al., 2021; Zhao et al., 2019). Por ejemplo, Aslankaya (2019) utilizó refuerzos de fibra de carbono de alta resistencia pegados con resina epoxi para reforzar dos tipos de uniones: empalme de llave y ensambles de caja y espiga, como se muestra en la Figura 47. Las juntas fueron sometidas a ensayos bajo cargas monotónicas para determinar su efectividad con respecto a las soluciones sin reforzamiento. En el caso de la junta solapada, se obtuvo que la fuerza máxima promedio fue de 9 veces mayor que el espécimen no reforzado, además, tras la pérdida de la fricción, se produjo una rápida disminución de la resistencia, sustituyendo el fallo frágil por una fase inelástica. Las uniones de caja y espiga reforzadas mostraron un incremento de la carga máxima de 1200 N a 3600 N, lo que representa un aumento del 300%. Si bien se observó un comportamiento de fallo frágil, el sistema de unión siguió funcionando y cargando hasta la tensión límite.

Por otro lado, Zhao et al., (2019) desarrolló un estudio experimental sobre el comportamiento sísmico de una antigua estructura de entramado de madera china a partir de un tramo de la sala principal del templo de Fo-guang, ubicado en la montaña de Wutai, provincia china de Shanxi, a escala 1:2. La solución de reforzamiento utilizada en las maderas dañadas de la estructura se realizó con láminas de fibra de carbono (CFRP), como se observa en la Figura 48. Entre las principales características y beneficios del CFRP, y que motivaron el uso del material como método de reforzamiento en este estudio, destacan la facilidad de adherir las láminas a las estructuras, su condición planar que permite revestir y pintar fácilmente las piezas y su ligereza que no añade un peso sustancial al armazón.

Los prototipos fueron ensayados en mesas vibratorias ante cargas laterales para determinar su eficiencia frente a los terremotos. Zhao et al. (2019)

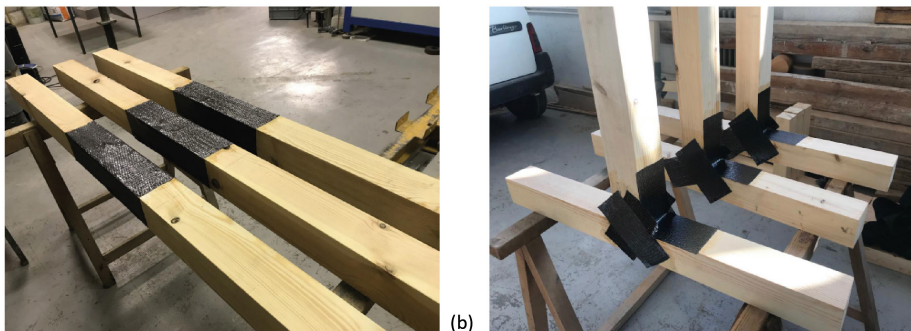


Fig. 47 Refuerzo con fibra de carbono para uniones carpinteras de tipo: (a) empalme solapado; (b) ensamble caja y espiga. (Aslankaya, 2019).

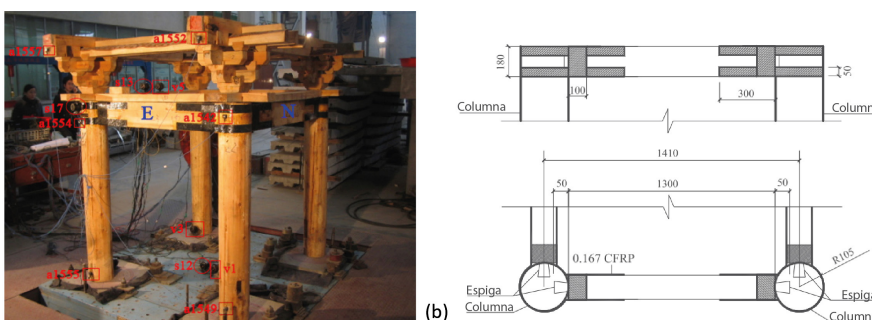


Fig. 48 Método con láminas de polímeros reforzados con fibra de carbono (FRP). (Zhao et al., 2019).

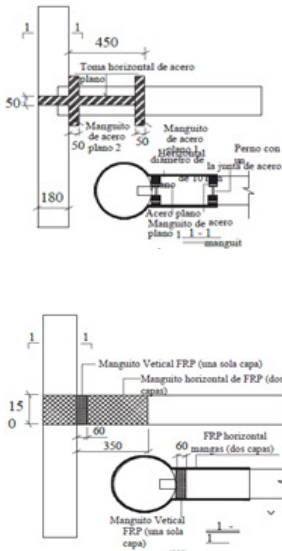


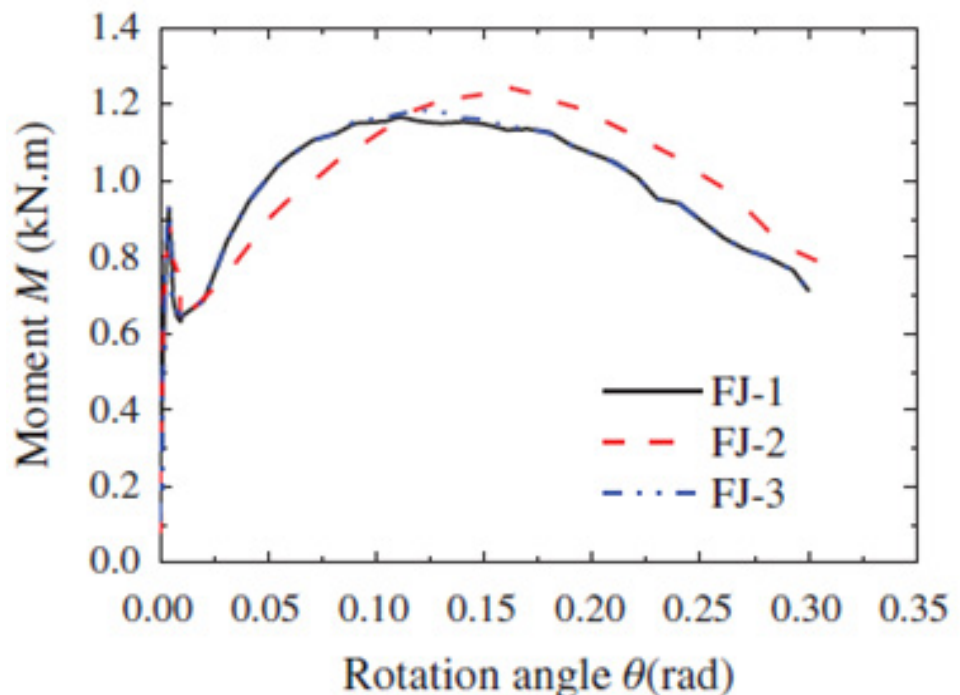
Fig.49 Solución de refuerzo: (a) lamina de acero plano desmontable; (b) fibra de carbono. (Li et al., 2021).

explicó que los resultados mostraron que la estructura luego de ser reparada con lamina de fibra de carbono sigue teniendo un buen comportamiento sísmico. Además, se observa que, en el caso de un terremoto menor, la energía sísmica es absorbida principalmente por la cabeza del pilar, y a medida que aumenta la carga, aumenta la disipación de energía del conjunto de soportes y disminuye la disipación de energía de la cabeza de pilar. Por otro lado, cuando la estructura se somete a terremotos de gran intensidad el 60% de la energía sísmica es absorbida por el conjunto de soportes, y la disipación de energía de la cabeza y base de la columna es constante.

Similarmente, Li et al. (2021) realizó ensayos experimentales con cargas monotónicas para determinar la capacidad de diferentes especímenes de uniones carpinteras del tipo caja y espiga, usualmente utilizadas en estructuras de entramado de madera chinas, con el objetivo de proponer y verificar a través de ensayos experimentales la efectividad de diferentes métodos de reforzamiento. En el estudio se diseñaron dos tipos de reforzamiento, el primero incorpora el uso de placas de acero desmontables (Figura 49a), y las otras láminas de fibra de carbono (Figura 49b). El refuerzo con placa de acero se dispuso en el centro de la junta, y el tornillo se extendió hacia el exterior de la viga de madera. Esta solución mantuvo las propiedades semirrígidas de la unión no reforzada, además de producir una mejora notable en la rigidez inicial y en la capacidad portante última de la estructura. Además, se logró evitar eficazmente la extracción de la espiga.

En cuanto a la unión reforzada con láminas de fibra de carbono (GFRP), se evidenció la pérdida de las propiedades semirrígidas de la conexión sin reforzar. Como se observa en Figura 50, en su fase inicial de carga, la solución con GFRP restringió completamente la rotación de la junta caja y espiga. No obstante, la rigidez rotacional es muy grande, elevando la curva casi verticalmente a lo largo de del eje Y, mostrando un cambio de las características semirrígidas al de una junta rígida. Finalmente, la caída de la curva corresponde al desprendimiento de la solución de refuerzo con GRFP en ambos lados de la columna

Fig.50 Grafico momento-ángulo de rotación unión reforzada con GFRP. (Li et al., 2021).



### 1.4.5 REFORZAMIENTOS CON SOLUCIONES MATERIALES INNOVADORAS: PLACAS DE BAMBÚ Y ELEMENTOS DE ALEACIÓN CON MEMORIA DE FORMA (SHAPE-MEMORY ALLOY)

Más recientemente, Wu et al. (2019) estudió diferentes soluciones de reforzamiento para uniones del tipo caja y espiga modernas, realizadas con el desarrollo de la tecnología de fabricación con control numérica por ordenador (CNC). Las propuestas se basan en el uso de placas de bambú ranuradas que se insertaran dentro de la espiga en tres diferentes patrones, tal como se observa en la Figura 51. Posteriormente, las uniones fueron ensayadas bajo cargas monotónicas. El resultado del experimento mostro que la anchura total y la orientación del grano de las placas de bambú influyen significativamente en el rendimiento mecánico de las juntas, generando así un aumento de la rigidez inicial entre un 11,4% y un 91,8%, además de un aumento en la capacidad de carga de momento entre un 13,5 y un 41,7%.

En una investigación más reciente, Huang & Chang (2016) elaboraron una propuesta de reforzamiento para una conexión de madera tipo clavija utilizando barras y tubos de aleación con memoria de forma o shape-memory alloys SMA como clavija (Figura 52). Esta materialidad tiene la capacidad de “recordar” su forma original y recuperarla después de ser deformados, experimentando “superplasticidad”, lo que significa que pueden deformarse considerablemente bajo una carga aplicada y luego recuperar su forma. (Abolmaali et al., 2006).

Huang & Chang (2016) ejecutaron ensayos bajo cargas dinámicas a diferentes niveles de desplazamiento, en una unión tipo clavija con barras y tubos de aleación con memoria de forma. Tal como se observa en la Figura 52, la unión se compone de tres piezas de madera y un pasador. Los resultados obtenidos en los ensayos muestran que las uniones con pasadores de SMA tienen un buen comportamiento auto-centrante, logrando mitigar de manera efectiva la deformación residual tras una deformación excesiva, en comparación a las uniones con pasador de acero. No obstante, las uniones con pasador de acero presentan una mayor resistencia.

Más recientemente, Xue et al. (2020) propone un innovador sistema de refuerzo utilizando hilos de aleación con SMA para uniones carpinteras tipo caja y espiga características en las estructuras tradicionales chinas de entramado de madera, tal como muestra la Figura 53. Xue et al. (2020) ejecutó ensayos de tracción monotónica y cíclica en tres uniones, con un número variable de seis, ocho y diez alambres de SMA por lado, obteniendo como resultado una mejora significativa de la capacidad de flexión, la rigidez inicial y la capacidad de disipación de energía de la unión. Tras la aplicación de la carga los hilos proporcionaron un rendimiento de amortiguación estable para

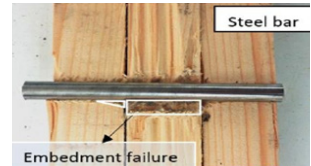
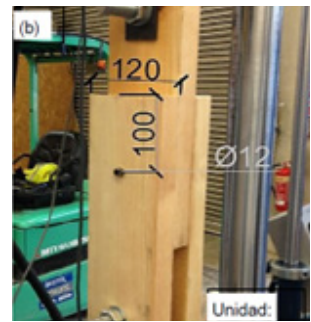


Fig. 52  
Varilla de aleación con memoria de forma (SMA). (Huang & Chang, 2016).

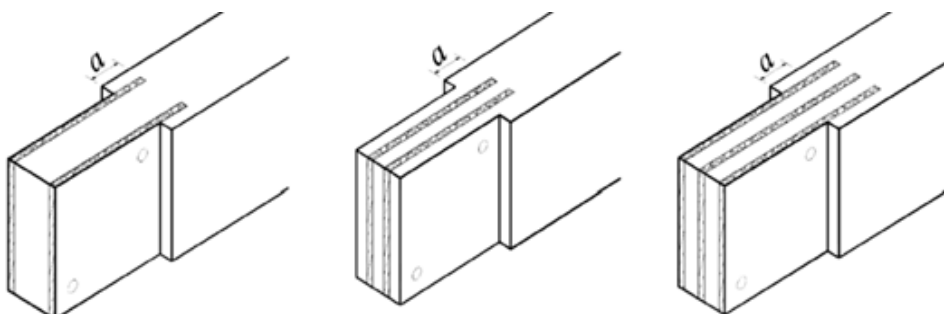


Fig. 51  
Placas de bambú ranuradas. (Wu et al., 2019).

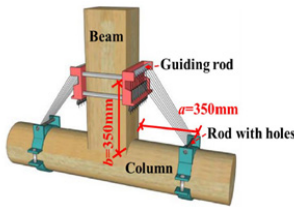


Fig. 53  
Refuerzo con hilos de aleación con memoria de forma. (Xue et al., 2020).

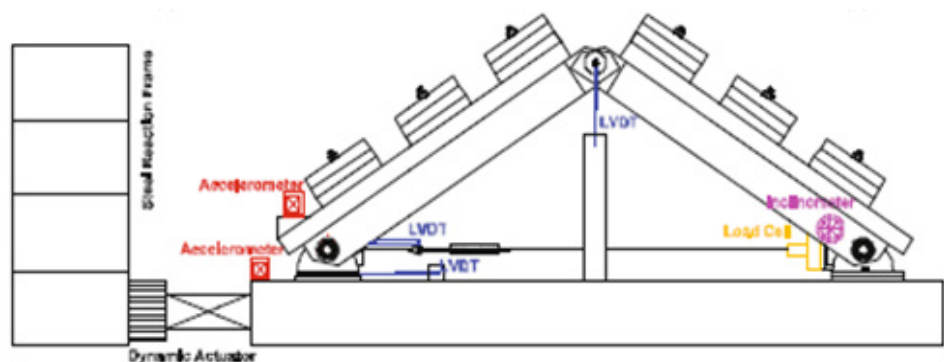
la junta sometidas a cargas cíclicas, y ayudaron a reducir la degradación de la disipación de energía a medida que la cantidad de hilos por lado aumentaba.

Cardone et al., (2019) también propusieron un dispositivo de refuerzo utilizando hilos de SMA para estructuras de cubierta en inmuebles patrimoniales, aplicado al caso de una iglesia histórica realizada en el siglo XIII en Brindisi (sur de Italia). El refuerzo propuesto consistió la integración de varios hilos de SMA en serie junto al tirante de acero existente en la unión con y sin refuerzo, para mejorar el comportamiento sísmico de la estructura, tal como muestra la Figura 54. En este caso, la capacidad del refuerzo ante cargas laterales fue evaluada mediante pruebas experimentales en cámara térmica y ensayos de mesa de terremotos con un modelo a escala reducida, compuesto por dos tablonces de madera unidos con una bisagra cilíndrica de acero y con libertad de giro producto de la presencia de arandelas de politetrafluoroetileno (PTFE). Los resultados mostraron que el modelo reforzado puede volver a centrarse al final del ensayo, mejorando significativamente el comportamiento sísmico de la estructura, reduciendo desplazamientos máximos transversales y evitando cualquier deformación plástica en comparación con el modelo sin refuerzo, que sufrió grandes desplazamientos residuales al final del ensayo, generando la necesidad de cambiar el tirante de acero para evitar el colapso de la estructura por posibles réplicas.

La mayoría de los estudios descritos en los apartados anteriores, que abordan el diseño de soluciones para el reforzamiento de las uniones carpinteras a través de aproximaciones experimentales, no implementan métodos de diseño para resolver problemas de inventiva. Esto se traduce en que, generalmente, no analizan las necesidades específicas de cada tipo de unión carpintera integrando otros aspectos, como los arquitectónicos o económicos, entre otros. La ausencia de aproximaciones relativas al diseño se manifiesta en que muchas de las soluciones revisadas son réplicas de otras técnicas existentes, o simplemente añaden pequeñas variaciones, sin una interpretación analítica de las necesidades particulares de cada unión.

Por otro lado, la ejecución de ensayos experimentales para el diseño de soluciones de reforzamiento requiere un importante despliegue de recursos técnicos, requiriendo equipamiento de un laboratorio de ensaye de materiales y estructuras, investigadores y técnicos expertos en ingeniería estructural, y tiempo. Estos métodos son sin duda un camino preciso para el prototipado y la validación de soluciones de reforzamiento, pero a menudo son inaplicables en la práctica debido a su exclusividad y alta necesidad de recursos especializados.

Fig. 54  
Tirante con hilos de aleación con memoria de forma (SMA). (Cardone et al., 2019).



## 1.5 MÉTODOS DE DISEÑO PARA RESOLVER PROBLEMAS DE INVENTIVA

Las diversas definiciones de diseño que actualmente se encuentran en la literatura evidencian la cercanía del concepto de diseño con un “conjunto de planteamientos y acciones necesarias para llevar a cabo y hacer realidad una idea” (Chaur, 2004). Autores como Pugh (1991) lo definen bajo el término de “diseño total” como una actividad sistemática desarrollada para satisfacer una necesidad, cubriendo desde la identificación de la necesidad hasta la venta del producto. Por otro lado, Pahl & Beitz (2007) lo definen como una actividad que afecta a casi todas las áreas de la vida humana, mientras que Dym & Little (2002) consideran que el diseño “es la generación y evaluación sistemática e inteligente de especificaciones para artefactos cuya forma y función alcanzan los objetivos establecidos y satisfacen las restricciones especificadas”. Bajo este paradigma de información, el diseño corresponde a una metodología estructurada dispuesta para la resolución de problemáticas. A partir de procesos sistemáticos, se busca comprender una oportunidad para el desarrollo e implementación de una idea (Julián et al., 2002).

Morris Asimow desarrolló en 1962 una metodología para abordar procesos de diseño de soluciones y productos conocida como “morfología del diseño” (Asimow, 1962). Esta metodología se divide en tres grandes etapas que van desde el diseño conceptual, al diseño de configuración y finalmente, el diseño detallado del producto. La primera etapa, denominada diseño conceptual, es considerada fundamental debido al proceso de análisis de las necesidades del cliente y del producto a lo largo de diversas subetapas, lo cual logra generar ideas preliminares de diseño. La segunda etapa, llamada diseño de configuración, se dedica a la configuración del diseño de producto, basada en la arquitectura, junto a la definición y configuración de los componentes. Finalmente, la tercera etapa, conocida como diseño detallado, define a través de aproximaciones cuantitativas e inherentes a la ingeniería el producto, es decir, un análisis del funcionamiento del diseño. Más recientemente, autores como Elizondo (2015), Rosas (2017) y Steinmeyer (2015) han desarrollado estudios más actualizados en la misma línea, basando sus trabajos y propuestas metodológicas para abordar procesos de diseño de productos en la metodología de Asimow (1962).

Por ejemplo, Rosas (2017) realizó el diseño mecánico de un prototipo funcional de banco de baterías para automóviles eléctricos livianos implementando la metodología “morfología de diseño” (Asimow, 1962) incluyendo nuevas etapas en el proceso original. En su estudio, la primera etapa, denominada “Ingeniería Conceptual”, es dedicada al diseño de conceptual del producto. Esta etapa se subdivide en cuatro fases que comprenden diversos pasos para lograr el objetivo. El primer paso corresponde a la definición del problema, que implica la declaración de la problemática y los requerimientos que el diseño del producto debería cumplir. En este mismo paso, y en base a los requerimientos, se establecen objetivos, restricciones y funciones para el diseño. Los objetivos se caracterizan por grupos dependiendo de su similitud, y son separados en objetivos estructurales y de operación, para luego ser jerarquizados en diferentes categorías. Los objetivos jerarquizados se organizan en un diagrama de árbol, para luego generar una argumentación correspondiente a las restricciones y funciones con el objetivo de establecer la relación entre los parámetros. La lista de objetivos se pondera con pesos relativos basados en la escala propuesta por Saaty (1990).

La segunda parte de la primera etapa “Ingeniería Conceptual” corresponde a un análisis funcional de los requerimientos y objetivos descritos en la actividad anterior, lo cual conduce a la elaboración de una lista de requerimientos técnicos, seguida por una matriz de requerimientos

técnicos-objetivos para observar la congruencia entre los objetivos y los requerimientos. Todos los pasos anteriores son reflejados en lo que se conoce como “despliegue de la función de calidad” para observar la relación que tienen entre sí, seguido de un estudio de referentes que abordaron el diseño de soluciones similares a la idea de diseño que se desea llevar a cabo. Finalmente, se aborda la generación de conceptos a partir de una carta morfológica derivada del estudio de referentes, seguida de un diagrama que muestra las diferentes alternativas. Una vez completada esta primera parte, se desarrollaron tres ideas primarias denominadas conceptos, las cuales fueron ponderadas y evaluadas para seleccionar la mejor de acuerdo con los objetivos. Una vez seleccionada, se procedió a desarrollar la ingeniería básica basada en la arquitectura del diseño, la configuración de los componentes, la comparación entre diferentes materiales, las dimensiones generales y los materiales seleccionados, finalizando con el diseño detallado del producto.

Por otro lado, Elizondo (2015), al igual que Rosas (2017), adopta la metodología denominada “morfológica del diseño” de Asimow (1962), e integrando nuevas etapas en su propuesta ejecuta el desarrollo de un dispositivo de soporte para una cámara de filmación aérea en un helicóptero AS350, conforme a los requisitos de una empresa aeronáutica. La metodología de Elizondo (2015) se basa principalmente en tres etapas: diseño conceptual, diseño preliminar y diseño a detalle. La primera etapa se establece en base a cuatro fases. En primer lugar, la definición del problema, referido a los requisitos del cliente y las restricciones normativas en el concepto de diseño. La segunda fase implica un análisis funcional, que se refiere al análisis del funcionamiento. A diferencia de la metodología de Rosas (2017), esta metodología integra un modelo de caja negra y transparente con el objetivo de analizar los flujos de entrada y salida del producto a diseñar, así como un estudio de mercado de productos similares al que se desea diseñar.

A continuación, Elizondo (2015) sigue pasos similares a la metodología de Rosas (2017), es decir, una lista de requerimientos, una matriz de requerimientos frente a objetivos y el despliegue de la función de calidad. En este caso, Elizondo (2015), al hacer uso de la matriz de despliegue de la función de calidad, identifica contradicciones que surgen en la lista de requerimientos establecidas previamente. Para solucionar las contradicciones que se consideran problemas de diseño, integra la metodología TRIZ para la resolución de contradicciones de los requisitos y establecer soluciones a las problemáticas presentes en el diseño de producto. La tercera etapa abarca la generación de conceptos, que se produce a partir de la revisión de patentes de productos similares o partes necesarias para diseñar un dispositivo de soporte para una cámara de filmación aérea en un helicóptero. Luego, se elabora una carta morfológica con todas las materialidades y posibilidades de diseño, y una vez estipulado, se generan tres conceptos o ideas preliminares de diseño. Finalmente, se realiza la selección del concepto de diseño basado en la metodología de selección de pesos ponderados realizados en la primera etapa. Posteriormente, se lleva a cabo el diseño de configuración basado en la definición del diseño o arquitectura, la configuración de sus componentes y, finalmente, el diseño detallado, en el cual se realiza un análisis funcional del diseño previamente definido.

Steinmeyer (2015) diseñó un equipo de enrollamiento de cintas transportadoras para la industria minera utilizando una metodología similar a la de Elizondo (2015). No obstante, presenta una variación en el paso de la implementación de una carta morfológica, ya que añade un mapa conceptual con las diferentes posibilidades que puede presentar el concepto de diseño desde el tipo de energía que utilizará, los materiales, el tipo de motor, las dimensiones de los elementos, y el tipo de frenos. De esta manera,

complementa la carta morfológica. Además, genera tres ideas de diseño base y selecciona una de las opciones en base a la metodología de pesos ponderados. En cuanto al diseño de configuración, define la arquitectura del diseño, tipo de arquitectura, la configuración, y los componentes especializados. Finalmente realiza el diseño detallado, en donde se genera la definición de componentes y un análisis estructural.

La metodología “morfología de diseño” (Asimow, 1962), adaptada por los autores Elizondo (2015), Rosas (2017) y Steinmeyer (2015), aplica métodos cualitativos de resolución de problemas de inventiva y análisis de las necesidades del producto y del cliente. Permite generar un análisis profundo de cada factor que afecta directa e indirectamente al diseño, produciendo una valoración cuantitativa de las necesidades. Esta metodología permite visualizar una serie de pasos integrados en una sola matriz y analizar de manera global cada aspecto de la investigación. También propone el análisis de contradicciones que puedan surgir dentro de las propias necesidades del diseño a través de una matriz de resolución de problemas de inventiva, buscando potenciar las características del diseño a través de soluciones innovadoras. No obstante, la redundancia en las etapas puede hacer la metodología resulte confusa debido a la reiteración de los mismos análisis de diferentes maneras. Por otro lado, las diferencias en los pasos propuestos por Elizondo (2015), Rosas (2017) y Steinmeyer (2015) podría integrarse en una misma metodología.





## **CAPÍTULO 2: SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE ENTRAMADO DE MADERA EN VALPARAÍSO**

El presente capítulo aborda la caracterización de los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso (Chile), con énfasis en el estudio de sus uniones carpinteras y en la definición de su estado de conservación y mantenimiento actual. En primer lugar, la Sección 2.1 busca establecer el contexto histórico del surgimiento de esta técnica constructiva en Valparaíso. Luego, el apartado 2.2, identifica aspectos de la configuración del almacén de madera y sus principales componentes estructurales.

### **2.1 CONTEXTO HISTÓRICO: ORIGEN Y CONFIGURACIÓN URBANA**

La ciudad de Valparaíso comenzó a tomar la forma que más o menos conocemos en la actualidad entre mediados del siglo XIX y comienzos del XX. Su trama urbana, asentada en medio de un talud natural de la planicie costera conocido por sus habitantes como “el plan”, está enmarcada por una cadena de numerosos montes llamados “cerros”, surcados por múltiples quebradas. Este paisaje natural conforma un anfiteatro orientado hacia la bahía del océano Pacífico (ver Figura 55).

El crecimiento demográfico y la modernización urbana de la ciudad estuvieron fuertemente ligados a dos hitos históricos a nivel nacional: primero, la independencia de Chile en el año 1818 y, posteriormente, la inserción de un sistema republicano que promovió la apertura comercial y la navegación en el océano Pacífico (Kapstein, 2018; Sánchez & Jiménez, 2011), convirtiendo a Valparaíso en un puerto importante como “punto de entrada y salida de la población” (Harris, 1996).

Diversos autores (Harris, 1996; Hidalgo et al., 2022; Prain, 2007) documentan que la población de Valparaíso comenzó a crecer exponencialmente cuando se consolidó el mercado mundial, momento en que Chile se convirtió en un estado asociado a la economía del salitre. A partir de ese instante, la ciudad se transformó en un sitio estratégico del país,

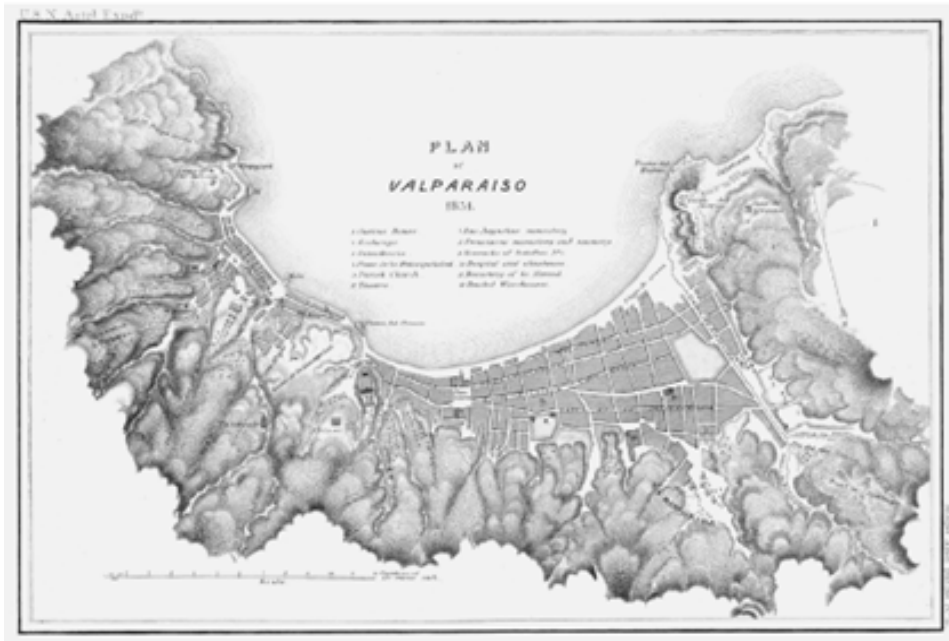


Fig. 55  
Plano de Valparaíso fechado en 1851.  
(Gilliss, 1855).

siendo un punto de recalada de todos los barcos que llegaban desde Europa y Estados Unidos con una gran diversidad de artículos para comercializar, entre ellos muchos materiales de construcción como planchas de fierro corrugado y madera aserrada. Estos elementos se convirtieron en materiales típicos dentro de las nuevas formas constructivas de la época otorgándole una nueva imagen la ciudad (Jiménez, 2014; Jorquera, 2022).

### 2.1.1 TRAZA URBANA, DEMOGRAFÍA Y ARQUITECTURA FORÁNEA

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, la ciudad de Valparaíso vivió el máximo apogeo de su crecimiento urbano. Bustos (2023) señala que desde el año 1850 se comenzaron a ejecutar los planes de ordenamiento en los asentamientos costeros de la ciudad, para el cohabitar de centros cívico con un puerto (Figura 56). Por otro lado, debido al auge del puerto, se produjo un importante proceso migratorio que atrajo numerosas familias extranjeras, mayoritariamente de europeos y norteamericanos, que se asentaron en la ciudad que siguió experimentando procesos de reorganización espacial a medida que la población aumentaba. Esta situación logró transformar la sociedad porteña rápidamente, dándole un carácter de ciudad cosmopolita. En el año 1885 “los extranjeros eran 7664 y representaban el 6,65% de la población de la ciudad”, que por ese entonces contaba con 104.952 habitantes (Ruiz, 1996).

La metrópolis mutó su configuración espacial, reorganizándose como resultado de la intensificación de la función portuaria y la necesidad de expandir la planicie costera con material de relleno, recuperando espacio del mar. Esta acción permitió el crecimiento en el territorio de manera radial desde el Barrio Puerto, sitio correspondiente al origen de la ciudad, configurado por los asentamientos tipo caserío entorno a la iglesia la Matriz y la Plaza Echaurren hacia un segundo sector conocido como el Almendral, debido a la gran cantidad de almendros que había en el lugar. Esta zona albergó servicios público y comercio en la primera planta de las edificaciones y una sociedad acomodada en los pisos superiores de los inmuebles (Figura 57).



Fig. 56  
Fotografía configuración del plano de la ciudad: Puerto de Valparaíso, hacia 1851. (Tretler, 1851).

Fig. 57  
Fotografía configuración del plano de la ciudad: Calle Blanco hacia el Almendral. (Leblanc, 1890).



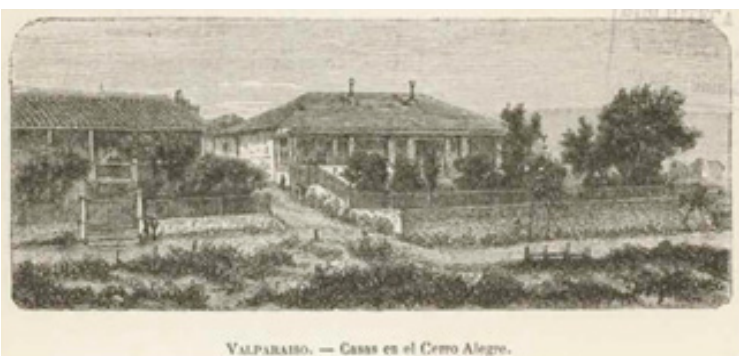
**Fig. 58**  
Fotografías ascensores de Valparaíso: (a) panorámica de Valparaíso, c. 1870. (Garreaud, 1870); (b) ascensor concepción, c. 1885. (Museo Histórico Nacional, 1855).

El sostenido auge edilicio fue un determinante para la configuración e imagen de la traza urbana de la ciudad. Los barrios tomaron una nueva identidad con una mixtura entre lo porteño y lo foráneo, “debido al inherente proceso de transculturación y adaptación de las condiciones que ofrecía el lugar” (Jiménez, 2014). Una vez consolidado el plano de la ciudad, los cerros comenzaron a poblarse de modo paulatino y espontáneo, sin ningún plan regulador, según explica Castillo & Waldo (2019). Los cerros Santo Domingo, Cordillera, Mesilla y Perdices, correspondientes al barrio puerto fueron los primeros en habitarse con una población de estrato social bajo. Esta reestructuración de la ciudad trajo consigo, además, la instalación de los reconocidos funiculares accionados a contrapeso (Figura 58), bajo un sistema hidráulico, denominados por sus habitantes como ascensores que van desde el plano de la ciudad hacia los cerros (Castillo & Waldo, 2019).

Posteriormente la llegada de la colonia inglesa junto con otras nacionalidades europeas, en la búsqueda de un espacio que les brindara tranquilidad, generó que la zona de los cerros Alegres y Concepción se tornaran en sectores idóneos para habitar, otorgándole la interpretación de ser cerros residentes para ilustres personalidades (CMN, 2004). En el año 1822 se inició el habitar de los cerros Alegre y Concepción por los ingleses William Bateman y John Martin, a pesar de esto, no es hasta el año 1840 que los cerros comienzan a poblarse de manera masiva por inmigrantes (Fuezalida, 2015). Aquella situación les dio una identidad moderna y foránea a estos cerros, caracterizándolos por ser lugares con calles empedradas, ascensores para conectar los cerros con el plano de la ciudad, alumbrado a gas, viviendas de madera con colores sobrios y jardines ornamentales (Figura 59).

En Valparaíso, a partir de la necesidad de construir en la pendiente surgieron diferentes configuraciones arquitectónicas en los cerros, con diversas orientaciones volumétricas que valoran la vista panorámica hacia la costa. Así lo evidencia Jiménez (2015), quien señala que las viviendas construidas con sistemas estructurales de entramado de madera exhiben el uso de ciertos elementos arquitectónicos que revelan un estilo común, a pesar de las múltiples variables genéricas presentes en estas áreas. Este estilo arquitectónico encuentra sus raíces en la arquitectura británica, específicamente en la arquitectura victoriana. Las pintorescas volumetrías arquitectónicas, características de la arquitectura vernácula de la ciudad, se distinguen por su relación interior- exterior a través de espacios intermedios. Estas construcciones suelen presentar fachadas sencillas de dos o más pisos, revestidas con plancha metálicas acanaladas y, frecuentemente, con terminaciones de gran calidad. Estos detalles en las terminaciones incluyen

**Fig. 59**  
Fotografías viviendas de finales del siglo XIX: Izq. “Casas en el cerro Alegre” (Tornero, 1872). Der. Paseo Atkinson 1900. (Grant, 1900).



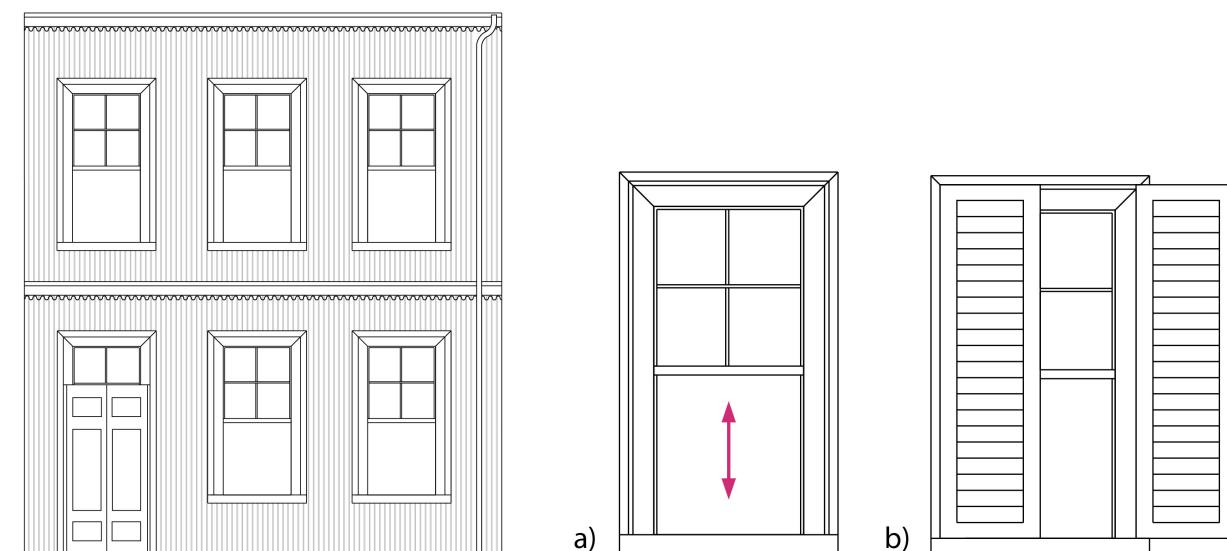


Fig. 60

Diagrama fachada simple acompañada por detalles vivienda ubicada en el cerro Concepción, Valparaíso; (a) ventanas de guillotina; (b) ventanas con persianas de madera.

vitrales, vidrios biselados, quincallería ornamentada, canes y guardamalletas de madera labrada, entre otros elementos (CMN, 2004). La Figura 60 muestra una fachada tipo esquemática donde se busca representar el uso de fachadas simples acompañadas por detalles como ventanas de guillotina y persianas de madera.

En este contexto se observa un cambio significativo en el patrón tradicional de construcción de viviendas en Valparaíso, Chile. La arquitectura hispano-colonial, caracterizada por muros de adobe recubiertos con cal y techumbre revestida por tejas de arcillas, fue reemplazada por edificaciones que empleaban diferentes técnicas y materiales. En particular, se adoptaron edificaciones de ladrillo revestidas con cal. Así como una novedosa técnica mixta conocida como “entramado de madera relleno con adobillos” o “tabique-adobillo”, que hacía uso de las uniones carpinteras para generar el ensamble entre los componentes del sistema estructural (Jorquera, 2022; Sánchez & Jiménez, 2011). La aparición de esta técnica se debe en parte a la disponibilidad abundante de recursos forestales en la época, junto con el suministro de materia prima proveniente de Norteamérica y otros países de Europa, como el pino Oregón y el roble, lo cual favoreció la proliferación de construcciones de entramado de madera en Valparaíso (ver Figura 61).

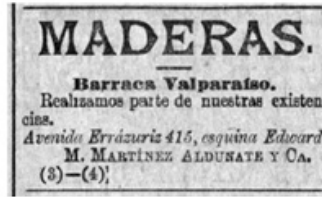
Bustos (2023) afirma que el declive de la ciudad porteña se enmarca entre los años 1900 y 1930. Periodo en el cual ocurrieron diversos acontecimientos, que provocaron un descenso de la actividad económica, financiera y portuaria en Valparaíso, ocasionando la desvalorización, el abandono y el deterioro urbano de la ciudad. En 1906 la ciudad sufrió una catástrofe, un terremoto de magnitud 7.9 en escala Richter, dejó gran parte de la ciudad destruida (ver Figura 62). Este suceso aceleró la llegada de la modernidad y el uso de hormigón armado (Jorquera, 2022). No obstante, la reconstrucción de Valparaíso fue lenta y se vio dificultada por diversos desastres naturales como incendios y terremotos menores. El periodo de 1912 -1930 fue el de mayor trascendencia en obras portuarias con la construcción de molos, muelle y espigones, elementos que le dieron cabida al comercio y al movimiento marítimo dentro del puerto. Bustos (2023) establece que a pesar de este ascenso del puerto se vio fuertemente afectado por la apertura del canal

de Panamá, la primera guerra mundial y la aparición del salitre sintético, logrando una importante caída del movimiento portuario de la ciudad.

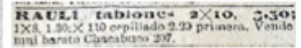
Fig. 61  
Fotografías de recortes extraídos de ejemplares de diarios mencionados entre los años 1905 y 1910, representativos del periodo de construcción de viviendas de madera (Gill, 2017).



▲ Diario La Unión, Octubre 1905.



▲ Diario La Unión, Enero 1905.



▲ Diario El Mercurio, Abril 1907.



▲ El Mercurio, Marzo 1908.



▲ Diario El Mercurio, Abril 1907.



▲ Diario El Mercurio, Abril 1907.



▲ Diario El Mercurio, Marzo 1908.



▲ Diario El Mercurio, Abril 1907.



▲ Diario El Mercurio, Febrero 1910.

Fig. 62  
Fotografías inmuebles sistema constructivo mixto, albañilería de ladrillo simple con entramado de madera, tras terremoto de 1906 en Valparaíso: Izq. Desprendimiento de fachada con peligro de derrumbe. Der. Plaza Echaurren. (Hardy, 1906).



## 2.2 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO

El sistema de entramado de madera relleno con adobillo se destacó por ser una técnica constructiva versátil y capaz de adoptarse a las condiciones y necesidades de construcción en pendiente, lo que resultaba especialmente importante en una zona propensa a movimientos sísmicos. La implementación de tecnologías, técnicas y materiales importados fue lo que condujo a la creación de viviendas con técnicas híbridas que combinaban el conocimiento local con el foráneo, como señalan Dávila & Contreras (2022). Además, las construcciones en Valparaíso fueron mayoritariamente consideradas “vernáculos”, lo que implica que se llevaron a cabo soluciones de adaptación al entorno y, en muchas ocasiones, fueron construidas por los propios usuarios. Este enfoque reflejó una conexión estrecha entre las necesidades y las características locales (Jiménez, 2014).

Autores como Dávila & Contreras (2022) estipulan que los sistemas constructivos de entramado de madera de Valparaíso generalmente organizan sus elementos constructivos bajo el modelo del sistema de plataforma por piso o platform frame. Jiménez (2014) también menciona que los ejemplares de la ciudad de Valparaíso tienen similitudes con el sistema conocido como “stud frame” en Inglaterra, ya que las piezas madereras que componen las estructuras tienen grandes escuadrías, que varían entre los 4”x4” y los 4”x6”, lo que lo diferencia del platform frame, que utiliza secciones más pequeñas y típicas de la madera aserrada. Asimismo, Jiménez (2014) de acuerdo con los ejemplares inspeccionados en su investigación de campo en la ciudad de Valparaíso, concluye que las estructuras de los edificios se pueden considerar tipologías híbridas, ya que combinan diversas soluciones constructivas de las tipologías arquetípicas conocidas como timber, balloon y platform frame, y que se caracterizan por el uso de uniones carpinteras con presencia de clavos u otros herrajes metálicos para conectar las piezas entre sí.

### 2.2.1 FUNDACIONES

La morfología de la ciudad y la necesidad de construir en pendiente llevaron a los constructores de la época a aplicar diferentes estrategias y técnicas constructivas para erigir las viviendas en los cerros de Valparaíso. Jiménez (2014) describe tres estrategias comunes para habitar la pendiente utilizadas en las construcciones de entramado de madera en Valparaíso. En la Figura 63, se observa la primera de ellas, que corresponde a la adición de elementos constructivos para generar un “aterrazamiento” del terreno. Uno de los sistemas comunes son los conocidos como zócalos, construidos comúnmente con estrategias de mampostería de ladrillo y piedra. Una segunda estrategia implica la sustracción o remoción de terreno para obtener una base nivelada sobre la cual construir. Por último, reconoce la estrategia de adaptación es mixta, que involucra acciones de sustracción y adición de terreno para generar terrazas a diferentes niveles. De acuerdo con Jiménez (2014), este tipo de soluciones se vincula con los ejemplares más novedosos y característicos de la ciudad, ya que las construcciones tuvieron que necesariamente adaptarse a la forma de los terrenos, encontrando soluciones como el apoyo de los forjados horizontales embebidos en el muro de contención, y no permitían la construcción de viviendas prefabricadas o estándares.

Las fundaciones de los edificios de entramado de madera en Valparaíso Jiménez (2014) comúnmente utilizan zapatas corridas de mampostería de ladrillo simple, posicionadas de acuerdo con los ejes estructurales de

Fig. 63

Diagrama estrategias para el asentamiento de viviendas en terrenos en pendiente: (a) adición de elementos constructivos: zócalos; (b) sustracción de terreno; (c) sistemas constructivos mixtos (a + b). (Jiménez, 2014).

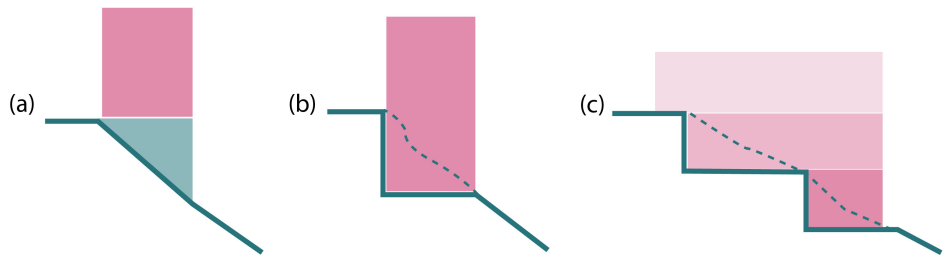
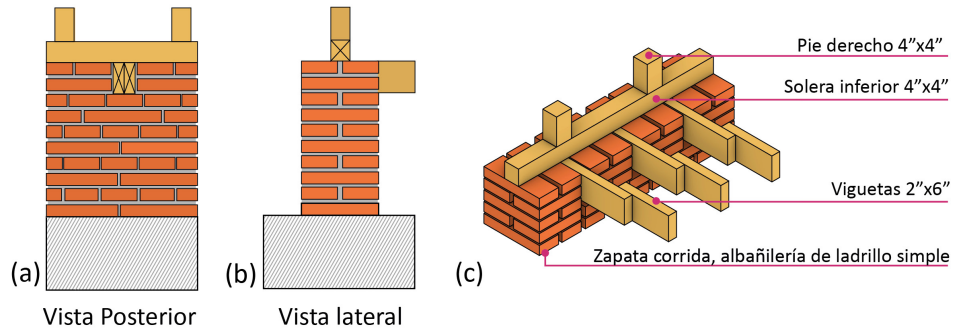


Fig. 64

Diagrama fundación con solera inferior anclada a la vigueta empotrada en la mampostería; (a) vista posterior; (b) vista lateral; (c) isométrica fundación. (Jiménez 2015).



las construcciones (Jiménez 2014). Estas cumplen la función de recibir los esfuerzos de compresión transmitidos por la estructura de madera desde la techumbre y a través de los elementos del entramado, generado por el peso propio y las cargas de uso. Como se observa en la Figura 64, sobre las fundaciones se distribuyen soleras o viguetas que constituyen el forjado del piso de la primera planta.

### 2.2.2 ENTREPISOS

De acuerdo con Jiménez (2014), los entramados horizontales de entrepiso y techumbre se configuran principalmente por viguetas de 2"x6", distanciadas cada 40 o 60 cm, y dispuestas sobre las soleras inferiores (ver Figura 65). Esta solución constructiva permite construir forjados independientes de los muros, tal como en el sistema de plataforma, donde las viguetas simplemente apoyadas sobre las soleras inferiores se aseguran con las soleras de los muros superiores que se construirán a continuación.

Según Jiménez (2014), en el entramado horizontal del primer nivel las viguetas son dispuestas de dos maneras. En primer lugar, simplemente

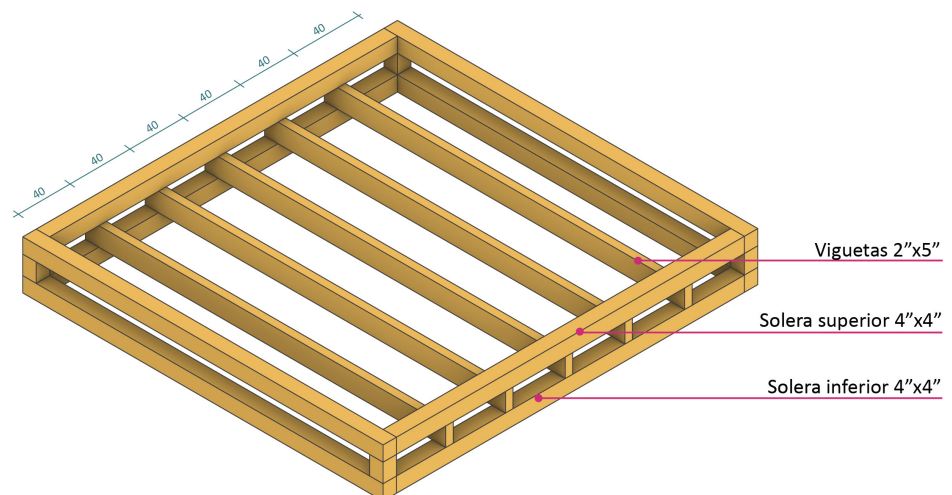


Fig. 65

Diagrama forjado horizontal entrepiso.

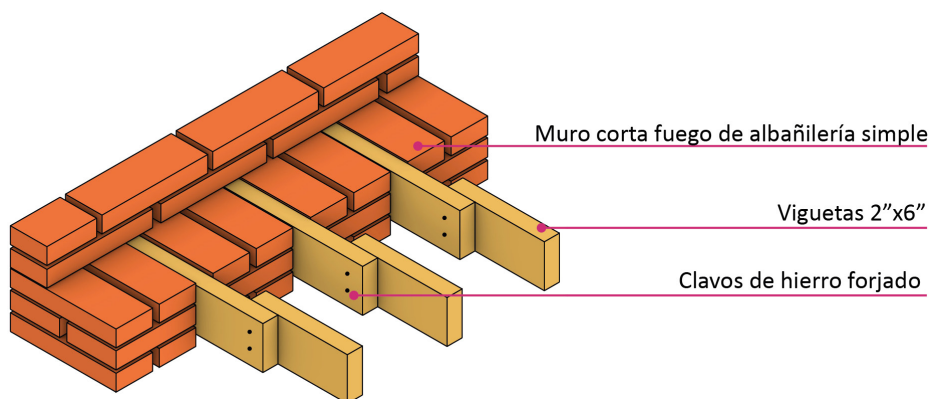


Fig. 66  
Diagrama técnico de amarre entramado de piso con muro de mampostería. Basado en diagrama de (Jiménez, 2014).

apoyadas sobre soleras dispuestas sobre las fundaciones (ver Figura 64), o embebidas entre los ladrillos de las fundaciones corridas (ver Figura 66), según corresponda. En algunos casos, se integran de vigas maestras de mayor sección. Cuando las viguetas quedan simplemente apoyadas sobre las soleras, estas se encajan gracias a pequeños rebajes de aproximadamente de 1 cm de profundidad (Jiménez, 2014). Cuando es necesario que las aumenten el largo de las viguetas para incrementar su luz, o trabajar un cambio de dirección para facilitar la conexión con los muros, se añaden tramos adicionales con la misma sección de los elementos, conectadas con clavos a las viguetas principales (Jiménez, 2014).

En las plantas superiores, el detalle del encuentro entre los sistemas de entresijo y los muros de albañilería de ladrillo simple, utilizado principalmente en muros medianeros, emplea una solución de amarre que se repite en el encuentro entre la fundación y el primer nivel de piso de los inmuebles. A medida que aumenta la altura del muro de mampostería su sección disminuye, y es a la altura del cambio de sección donde se emben las viguetas entre los ladrillos, quedando viguetas y ladrillos nivelados con el piso, tal como muestra la Figura 62.

### 2.2.3 MUROS

Los muros de los sistemas constructivos de entramado de madera característicos de Valparaíso se componen de elementos de madera esbeltos dispuestos en diferentes posiciones y orientaciones, según la función que desempeñan dentro del armazón, tal como se diagrama en la Figura 67. El sistema de muro o tabique se compone principalmente de elementos verticales denominados pies derechos, espaciados cada 40 o 60, modularmente entre las soleras superiores e inferiores adaptados a la longitud del muro. Las soleras son elementos horizontales, que cumplen la función de asegurar confinar los pies derechos y dar estabilidad autónoma a los paneles que conforman los muros. Los muros están arriostrados con elementos diagonales o “riostros”, y se posicionan entre tres pies derechos, dividiendo el central por la mitad, tal como se observa en la Figura 67. Por último, se distinguen los elementos tipo dinteles, que se utilizan para configurar los vanos presentes en la estructura.

Los muros en las fachadas exteriores de los entramados de madera suelen rellenarse con bloques de adobillo, dispuestos entre los pies derechos, soleras y diagonales. El adobillo, según la definición de Dávila & Contreras (2022) es un “bloque de tierra y paja, sin cocer, que posee el detalle de una muesca o ranura en sus extremos para ser ensamblado a un tabique estructural de madera, formando un muro”. La muesca se inserta entre listones de 1”x 1” o 2,5 x 2,5 cm, generalmente de álamo, colocados en la cara interior de los pies derechos, generando una trabazón de los elementos (ver Figura 68). Esta conexión proporciona resistencia sísmica a la estructura, evitando

Fig. 67  
Diagrama entramado de muro. (Jiménez, 2014).

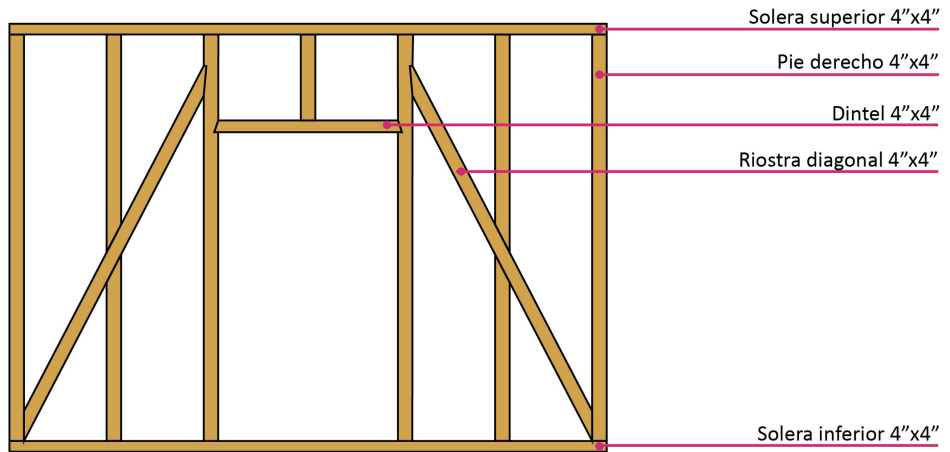
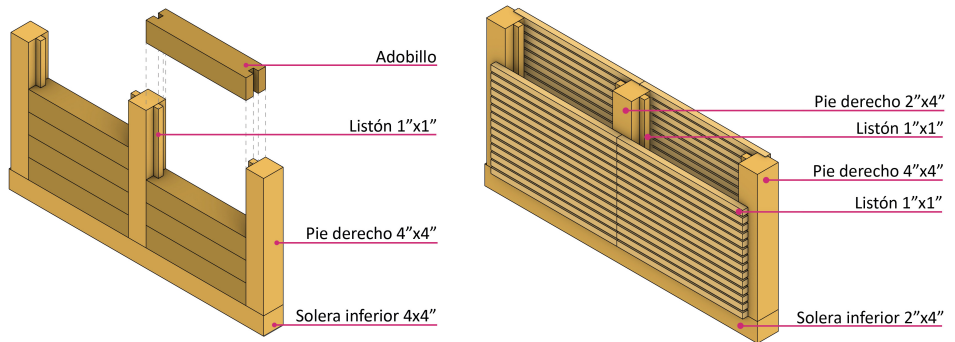


Fig. 68  
Diagrama: Izq. Trabazón de adobillo entre pies derechos. Der. Técnica de palillaje en estructura de entramado



el volcamiento de los bloques durante eventos sísmicos. Según Dávila & Contreras (2022), el tamaño comúnmente utilizado del adobillo en la ciudad de Valparaíso es menor al tamaño común de un adobe en Chile (60x30x10 cm), siendo el adobillo de 45x10x10 cm.

Por otro lado, los muros interiores son revestidos con un sistema de palillaje, conocido como lath and plaster, similar a la técnica de la quincha. Este sistema se utiliza generalmente para alivianar los entramados de madera, despojándolos de sus adobillos, pero con la intención de generar una base para recibir el revestimiento. Este tipo de revestimiento se compone sobre el armazón de madera con un sistema listones de 1"x1" dispuestos horizontalmente entre los pies derechos y separados entre 1cm y 3 cm (ver Figura 68). Sobre este palillaje va un acabado de tierra y paja que eventualmente es pintado o revestido con otras materialidades (Jiménez, 2014).

### 2.2.4 UNIONES CARPINTERAS

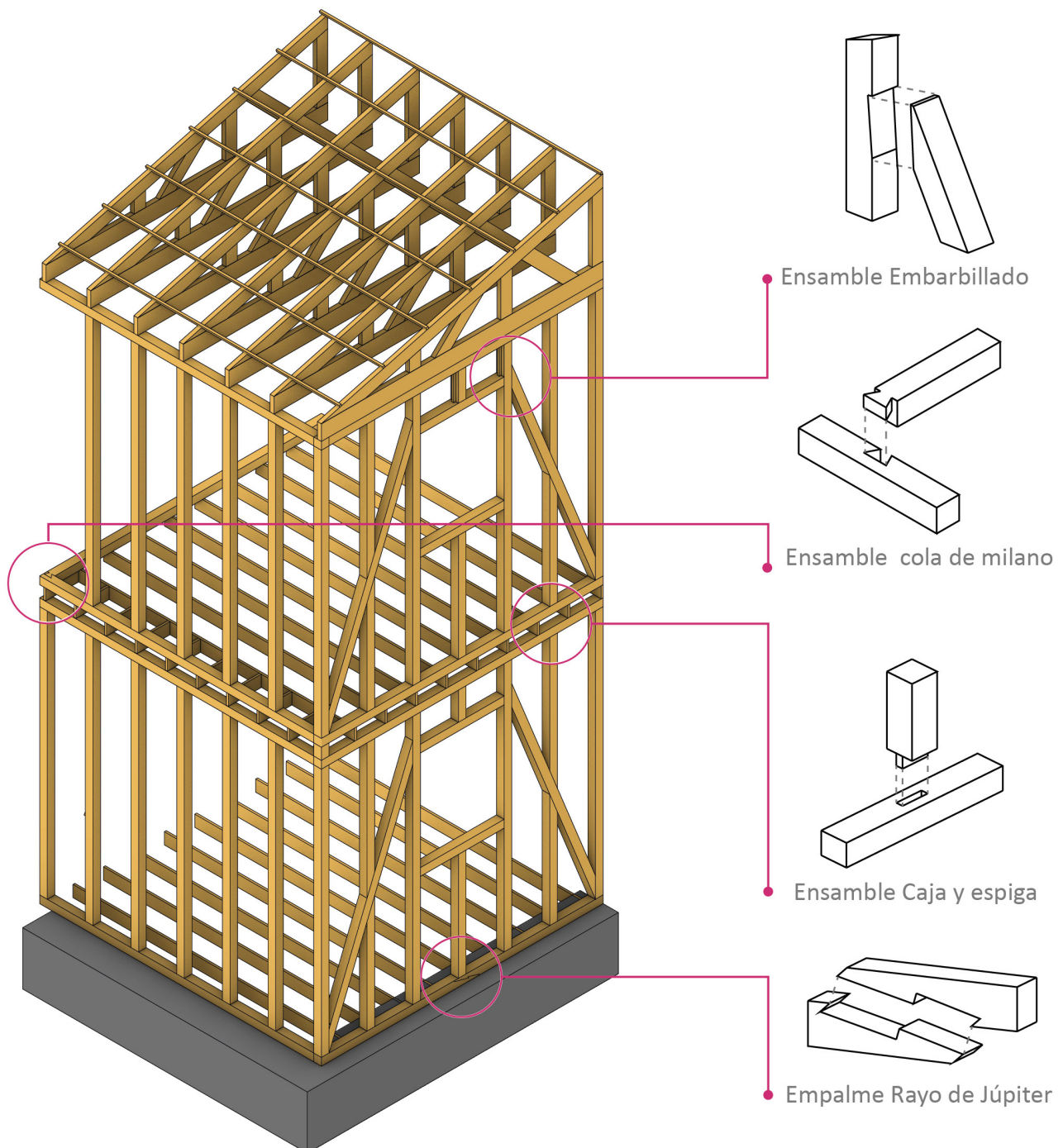
La conexión entre los diferentes elementos de madera que componen el armazón se realiza a través de complejas uniones carpinteras. No obstante, es común observar clavos en las juntas como parte de una estrategia posterior de reforzamiento local para las uniones ensambladas (Jiménez, 2014). Estos clavos tienen como objetivo asegurar la estabilidad de las conexiones y prevenir la separación de las piezas o desplazamientos que podrían ocurrir debido a los constantes sismos.

Autores como Dávila & Contreras (2022); Jiménez (2014) coinciden en que las uniones carpinteras más comunes en la ciudad de Valparaíso son el ensamble caja y espiga, generalmente utilizado en la unión entre pies

derechos y soleras (ver Figura 69a); el ensamble embarbillado o de espera, ubicado en la unión entre pies derechos y las riostras o diagonales (ver Figura 69b); el ensamble a media madera, en la unión de esquina entre soleras (ver Figura 69c); el ensamble cola de milano en el encuentro perpendicular entre soleras; y el empalme rayo de júpiter, utilizado para extender la luz de las vigas (ver Figura 69d).

Por otro lado, los autores González & Maino (2019) y Jiménez (2014) en sus estudios en terreno en la ciudad de Valparaíso, exponen diferentes uniones carpinteras encontradas en sus estudios de campo en estructuras de entramado de madera. A partir de este estudio González & Maino (2019) señalan en su estudio de campo sobre uniones carpinteras en la ciudad de Valparaíso que la unión caja y espiga presenta diversas variaciones. Una de ellas es el ensamble caja y espiga bilateral (Figura 70), que implica el recorte

Fig. 69 Diagrama uniones carpinteras más comunes en sistemas de entramado de madera de la ciudad de Valparaíso.



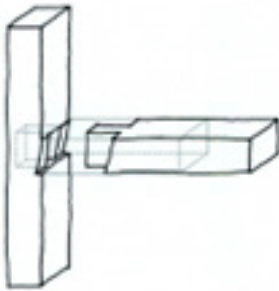
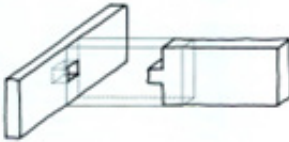


Fig. 70  
Tipologías ensamble caja y espiga bilateral. (González & Maino).

Fig. 71  
Tipologías ensamble caja y espiga: bilateral pasante. (González & Maino, 2019).

Fig. 72  
Tipologías ensamble caja y espiga con espera. (González & Maino).

Fig. 73  
Ensamble media cola de milano ciega. Fuente: (González & Maino, 2019).

en un tercio de la espiga y los hombros por ambos lados. González & Maino (2019) también documentan el ensamble de espiga bilateral pasante (Figura 71), en el cual la espiga atraviesa completamente la caja. Esta tipología se utiliza en el encuentro entre vigas con una espiga de sección cuadrada. Además de estas variantes, se identificaron ensambles caja y espiga con espera (Figura 72), en el encuentro entre jambas y dintel, que corresponde al encaje entre un elemento vertical en el extremo de otro horizontal, creando dos cortes en la pieza vertical, generalmente abiertos en el tercio central.

Tanto González & Maino (2019) como Jiménez (2014) realizan hallazgo del ensamble cola de milano, sin embargo, este corresponde a una de sus variantes conocidas como ensamble de media cola de milano ciega. González & Maino (2019) en su libro “Uniones carpinteras de Valparaíso”, la caracteriza por tener una caja y espiga con forma de trapecio isósceles, utilizada generalmente en el encuentro intermedio entre soleras inferiores (ver Figura 73).

En cuanto al ensamble embarbillado o de espera, González & Maino (2019) expone cuatro tipologías de esta unión. La primera corresponde al ensamble de espera, conocido como ensamble frontal o simple, mencionado anteriormente. Este ensamble tiene múltiples usos en inmuebles históricos de la ciudad, como el encuentro entre diferentes elementos de la techumbre como entre el par y el tirante, el pie derecho y la tornapunta, el poste y el jabalcón, o el pendolón y el jabalcón. El segundo corresponde a un ensamble de barquilla, conocido como embarbillado de talón, que se utiliza generalmente entre el par y el tirante cuando el ángulo entre los dos elementos es menor a 30°. Junto a lo anterior, se encontró la unión de espera y barquilla, mencionada anteriormente como embarbillado doble. En este ensamble, la barquilla delantera o frontal debe ser menos profunda que el talón para evitar el agrietamiento del tirante por sollicitación de la misma fibra. Se utiliza igualmente entre el par y el tirante. Finalmente, la unión de espera con cajeado, conocido como embarbillado con espiga, que consiste en el encaje de una unión embarbillado frontal con la implementación de un sacado para generar la caja y un labrado en la pieza de la barquilla en forma de espiga. Esta unión se utiliza entre el par y la tornapunta o el par y el jabalcón.

González & Maino (2019) reconocen en su estudio de campo tres tipos de empalme en los edificios históricos de la ciudad de Valparaíso. Primero, los empalmes a media madera de testas rectas, la unión horizontal empalmada mediante un rebaje a la mitad de la altura de la pieza de madera. Esta unión se utiliza comúnmente en la prolongación de correas, pares o vigas, en soleras inferiores o en apoyos continuos sobre cimientos. En segundo lugar, la unión de rayo de jupiter, empalmada mediante un corte en forma de “S” perpendicular a la dirección del eje longitudinal del corte para evitar que se desarme la junta. Este tipo de unión se usa para prolongas las vigas parhilara, pares y correas. Finalmente, González & Maino (2019) mencionan el empalme pico de flauta, empalmado mediante un corte en forma de “S larga” rectilínea tumbada, utilizado en la prolongación de correas, sobre o cerca de un apoyo vertical como par o viga.



## CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIONES CARPINTERAS TRADICIONALES DE LOS ENTRAMADO DE MADERA DE VALPARAÍSO: ESTUDIO DE CASOS

El presente capítulo aborda la caracterización geométrica y estructural de las uniones carpinteras existentes en los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera de Valparaíso (ver Figura 74). El análisis se lleva a cabo mediante un estudio de casos, que incluye la inspección técnica de los entramados y sus uniones con énfasis en describir sus características geométricas, rol estructural en el marco, y comportamiento característico ante diferentes condiciones de carga. El Capítulo integra la descripción de la metodología para selección de casos e inspección de estos (Sección 3.1). En la sección 3.4.4 se describe la ficha de recopilación de datos, y, posteriormente, en la sección 3.1.2 se describen brevemente los casos de estudio. Luego, desde el apartado 3.2 al 3.5 se describen las uniones características de los entramados, inspeccionadas in situ, incluyendo sus roles y comportamientos característicos dentro del marco. Posteriormente, el apartado 3.6 incluye una

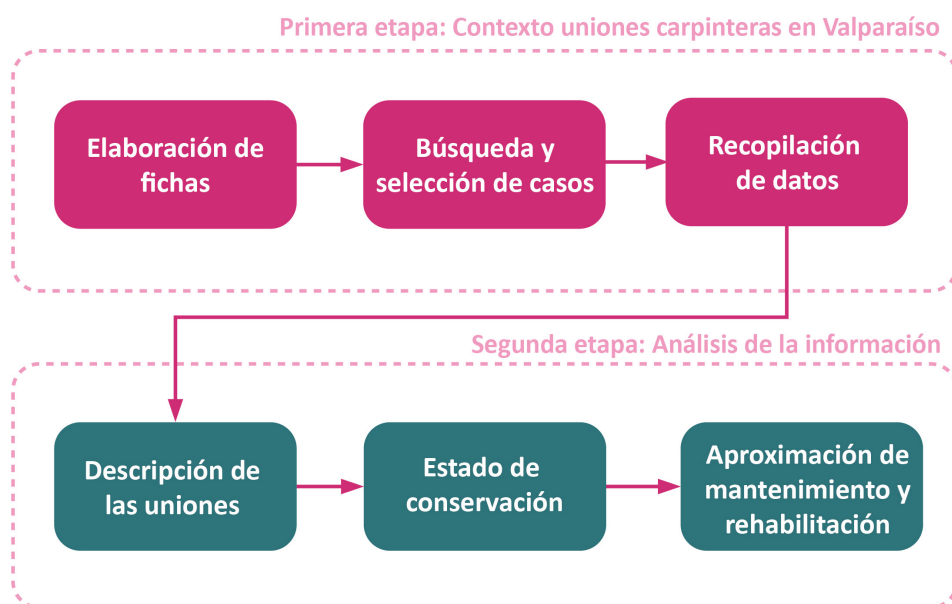


Fig. 74  
Diagrama metodología capítulo 3. Caracterización de las uniones carpinteras tradicionales de los entramados de madera de Valparaíso: estudio de casos.

descripción del estado de conservación de las uniones observadas in situ, clasificada de acuerdo con los daños existentes, y, finalmente, el apartado 3.7 describe las aproximaciones para el mantenimiento y rehabilitación de los marcos y uniones en la práctica en Valparaíso.

### 3.1 METODOLOGÍA

La metodología para ejecutar el estudio de casos busca establecer una aproximación sistemática para adquirir, recopilar, y analizar datos homogéneos desde inspecciones in situ de los inmuebles, especialmente en relación con las uniones carpinteras y su estado de conservación actual. Para ello, se elaboró una ficha de recopilación de datos para adquirir información general del inmueble tales como la ubicación, el rol, el sistema constructivo, y el revestimiento, entre otros. De manera específica, se enfoca en el estado de conservación de las uniones carpinteras, con un énfasis en los ensambles caja y espiga, embarbillado y cola de milano presentes en la estructura de entramado de madera de muro en la ciudad de Valparaíso.

A continuación, se describe brevemente la ficha de recopilación de datos elaborada (Sección 3.1.1) y los casos seleccionados. Además, el Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6 y Anexo 7 presentan la información de cada caso de estudio utilizado en la investigación.

#### 3.1.1 ESTUDIO DE CASOS Y FICHA DE RECOPIACIÓN DE DATOS

Las Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5 muestran la ficha de recopilación de datos elaborada en este trabajo, que se divide en seis categorías (Arana, 2019; Bustos, 2023; B. Jiménez, 2020). La primera parte de la ficha “Sección 1: Información General” recopila datos del inmueble (Tabla 3), tales como su ubicación, rol, año de construcción. Además, se informa la protección que posee el inmueble de acuerdo con el plan regulador de la ciudad y la zonificación realizada por la UNESCO. La segunda parte de la ficha corresponde al “Sistema constructivo”, esta recoge información técnica general de la estructura y de sus principales componentes estructurales, como muros, entresijos y techumbres. La tercera parte de la ficha “Revestimientos” recoge información técnica de las técnicas utilizadas para revestir los muros exteriores, interiores, y los entramados de pisos y techumbre.

La sección 4 (Tabla 4) recoge información sobre las uniones características existentes en el entramado estructural, detallando la tipología y posición en la que se encuentren en el inmueble. La subsección 4.1 evalúa el estado de conservación de las uniones, y la sección 4.3 informa si existen o no patologías o lesiones presentes en el inmueble y enfocadas en las uniones carpinteras mencionadas en la sección anterior. Esta sección de las fichas referentes a las patologías se basa en la ficha de (Arana, 2019) y las patologías recopiladas en la sección 2.3. “Principales causas de deterioro de las estructuras de madera”. Finalmente, la subsección 4.4 recoge observaciones generales de las uniones carpinteras (Tabla 5)..

La aplicación de la ficha se realizará in situ y estará acompañada de la inspección visual de las estructuras de madera de los edificios, con el

objetivo de registrar los daños y deterioros presentes en la misma. Además de recoger los datos solicitados en la ficha, durante la fase de inspección se busca identificar el origen de las lesiones y el proceso patológico específico de cada inmueble. Por otro lado, se lleva a cabo un levantamiento geométrico y fotográfico del sistema estructural y las lesiones que se encuentren en la estructura, y especialmente en las uniones.

Tab. 3

Ficha técnica; sección 1 información general; sección 2 técnicas constructivas; sección 3 método de revestimiento.

Ficha Técnica		ID:			
Sección 1: Información General					
1.1. Dirección	Nombre del Inmueble:		Croquis o foto		
	Calle:				
	Número:				
	Cerro:				
	Rol:				
1.2 Uso y clasificación patrimonial	Uso:				
	Año de construcción:				
	N° de piso:				
	Estilo arquitectónico:				
	Zona Sitio Patrimonio Mundial				
Protección Patrimonial	Sí	Tipo:			
	No				
Notas:					
Sistema constructivo	Fachada principal	Muros laterales	Muros interiores	Entrepisos	Techumbre
Híbrido					
Mampostería en piedra					
Albañilería de ladrillo					
Mixto (Madera/Tierra)					
Madera					
Acero/Hierro					
Adobe					
Alterado o modificado					
Revestimiento		Muros exteriores	Muros interiores	Entrepisos	Techumbre
Zinc					
Yeso + pintura					
Palillaje (listones de madera y argamasa de tierra)					
Entablado de madera					
Baldosas					
Planchas OSB					
Otro:					
Alterado o modificado:					

Tab. 4

Ficha técnica: Sección 4 uniones carpinteras típicas de entramado de muro; Sección 5 Estado de Conservación de las uniones carpinteras.

Sección 4: Uniones carpinteras tradicionales					
4.1. Tipo de unión	Ensamble caja y espiga		4.2. Ubicación		
	Ensamble embarbillado				
	Ensamble cola de milano				
	Otra: _____				
4.3 Estado de conservación de las uniones					
Estado	Ensamble caja y espiga	Ensamble embarbillado	Ensamble cola de milano	Otra unión: _____	
Bueno					
Regular					
Malo					
<b>Nota:</b>					
	Sintomatología	Agente patológico	Ensamble Caja y espiga	Ensamble Embarbillado	Ensamble Cola de milano
i. Biológicas	a) Disgregación	1) Presencia de Xilófagos (termitas o coleópteros)			
	b) Agrietamiento	2) Carga y sobrecarga			
c) Separación de la unión					
d) Rotura					
ii. Mecánicas	e) Fisura	3) Dilatación			
		4) Contracción			
iii. Físicas	f) Humedad	7) Capilar			
		8) Filtración			
<b>Nota:</b>					

Tab. 5

Ficha técnica: sección 6 observaciones de las uniones carpinteras.

4.2: Observaciones	
Unión carpintera	Observaciones
Ensamble Caja y espiga	
Ensamble Embarbillado	
Ensamble Cola de milano	
Otra: _____	

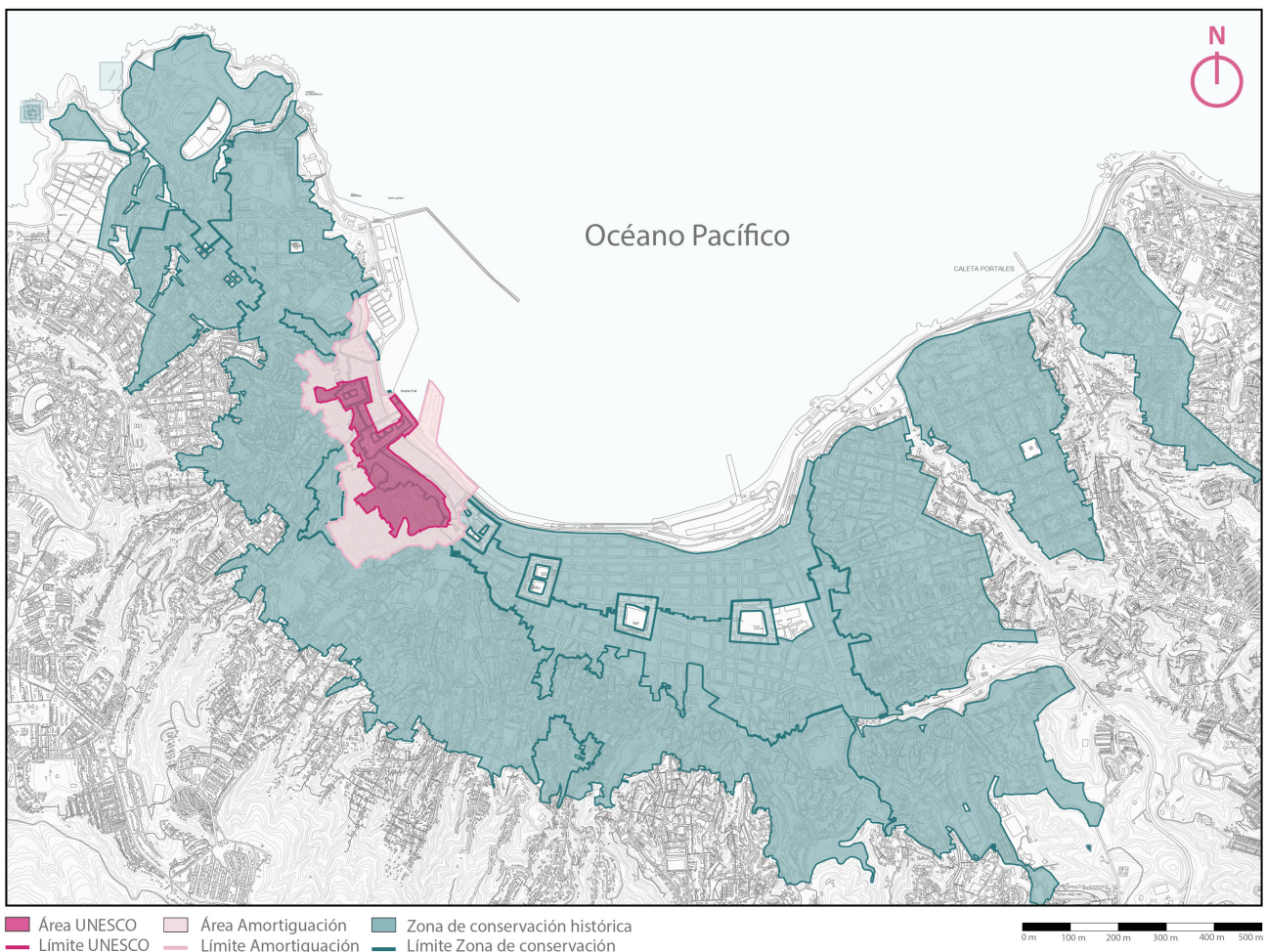
### 3.1.2 CASOS DE ESTUDIO

Previo a la aplicación de la ficha, se realizó una búsqueda de casos de estudio en el área UNESCO de la ciudad (ver Figura 75), dando prioridad a la zona designada como Sitio Patrimonio Mundial, seguida por el área de amortiguación delimitada por la zona típica, y finalmente, al área de conservación histórica de la ciudad. Dentro de esta etapa, se establecieron criterios para la selección de los casos: En primer lugar, se requiere que estos inmuebles que cuenten con un sistema de entramado de madera característicos de las construcciones que datan de finales del siglo XIX y principios del siglo XX. En segundo lugar, los inmuebles deben encontrarse en un proceso de obra, ya sea restauración, rehabilitación, mantenimiento u otro, con la posibilidad de realizar inspecciones de la estructura y analizar las uniones carpinteras presentes en ellas.

Durante la etapa de búsqueda y selección de casos se encontraron cinco inmuebles que cumplieron con los criterios seleccionados:

- Caso 1: Calle Higueras #179
- Caso 2: Calle Almirante Montt #107 #109
- Caso 3: Calle Monte Alegre #386
- Caso 4: Calle El Litre #1220
- Caso 5: Calle Ossandón #275

Fig. 75  
Planimetría área UNESCO y zona de conservación histórica de Valparaíso. (Vergara & Casellas, 2016).



La información general de recopilada de los casos que fueron estudiados está desplegada en el Anexo 1 - 5, en conjunto con las fichas completadas, que incluyen levantamiento geométrico, fotográfico y descripciones de las observaciones en terreno. En específico, se muestra una caracterización de los inmuebles, incluyendo aspectos generales, arquitectónicos y estructurales de cada uno. En algunos casos, fue posible realizar levantamientos planimétricos gracias a que esta fue proporcionada o a que se pudo realizar mediciones in situ para su elaboración. Para el resto de los casos, las descripciones se complementan con fotografías.

A continuación, se describen en específico las características de principales uniones carpinteras encontradas e inspeccionadas en los casos de estudio, incluyendo aspectos como la geometría, función y rol estructural en el marco, así como el estado de conservación de las uniones.

### 3.1.3 ENSAMBLE CAJA Y ESPIGA

La unión caja y espiga es una de las técnicas clásicas de ensamblaje utilizada en la carpintería de armar en inmuebles históricos de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso (ver Figura 76). Este tipo de unión consiste en un ensamblaje compuesto por dos elementos de madera, donde la primera pieza tiene un extremo labrado en forma de paralelepípedo denominado espiga, la cual se encaja en otro elemento de madera que contiene una entalladura con la misma forma llamado caja, generando la conexión entre ambas partes del armazón (ver Figura 77). La unión caja y espiga se utiliza principalmente en la conexión entre pies derechos y solera inferior o superior, generando un encuentro en ángulo de 90° bajo una configuración tipo “L” o “T” (ver Figura 76b).

En los cinco casos de estudio, se encontró evidencia de que estas uniones se ubican en la posición mencionada anteriormente dentro del entramado de madera. En cuanto a las proporciones de estas uniones, González & Maino (2019), en su libro “Uniones carpinteras de Valparaíso”, establecen que las proporciones de esta unión son como las que se observan en la Figura 78 y Figura 79. Dichas proporciones fueron corroboradas durante la inspección en terreno, como se muestra en la Figura 80, se observa que la caja tiene un espesor correspondiente a  $\frac{2}{3}$  del su largo.

En Valparaíso, y según lo evidenciado en la literatura (González & Maino, 2019; Jiménez, 2014), las variaciones dentro del armazón de madera en

Fig. 76

Ensamble caja y espiga: (a) fotografía muro entramado de madera con adobillos encontrada en el Caso1: Calle Higuera #179; (b) diagrama parte del muro con las uniones caja y espiga indicadas.



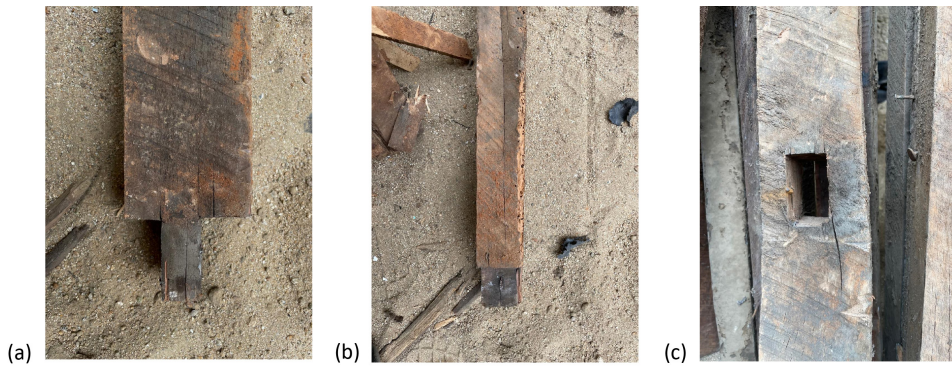


Fig. 77  
Fotografía variaciones ensamble caja y espiga; (a) espiga casa litre; (b) espiga sección lateral casa litre; (c) caja entallada en la solera encontrado en el Caso 4: El Litre #1220.

construcciones históricas se deben a las diferentes funciones que cumplen los elementos dentro del sistema. Durante la inspección de los casos de estudio en Valparaíso, se identificó la presencia de la unión caja y espiga en diferentes formatos. La más común fue la unión caja y espiga tipo bilateral (ver Figura 78), que se configura por una espiga que tiene un largo que corresponde aproximadamente a  $2/3$  la sección de la solera inferior, donde se inserta la espiga, permitiendo que los hombros de la unión que queden a tope con la solera, y que la espiga no llegue al fondo de la caja. En general, las espigas tienen un ancho que corresponde a  $1/3$  de la sección, como se observa en la Figura 37. En los casos de estudio también se encontró evidencia de uniones caja y espiga pasante (ver Figura 79), donde, a diferencia del caso anterior, la espiga tiene el mismo largo que la sección de la solera, atravesando todo el largo de la caja.

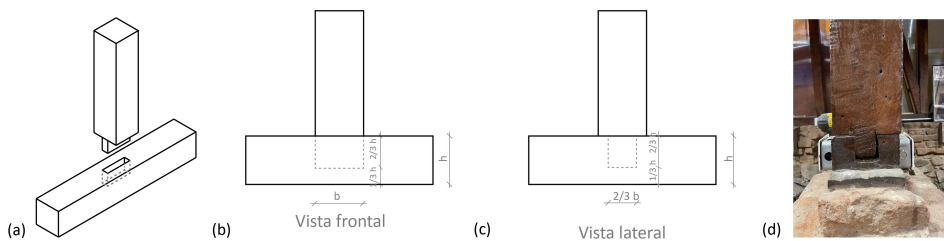


Fig. 78  
Ensamble caja y espiga bilateral: (a) diagrama ensamble caja y espiga bilateral; (b) fotografía unión caja y espiga bilateral encontrada en el Caso 2. Calle Almirante Montt #107 #109.

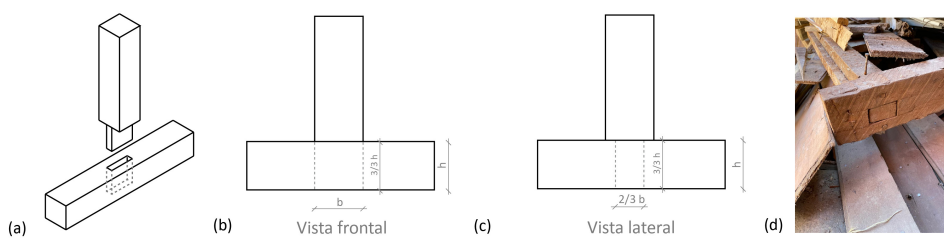


Fig. 79  
Ensamble caja y espiga pasante: (a) diagrama ensamble caja y espiga pasante; Fotografía ensamble caja y espiga pasante encontrado en el Caso 4. Calle El Litre #1220.

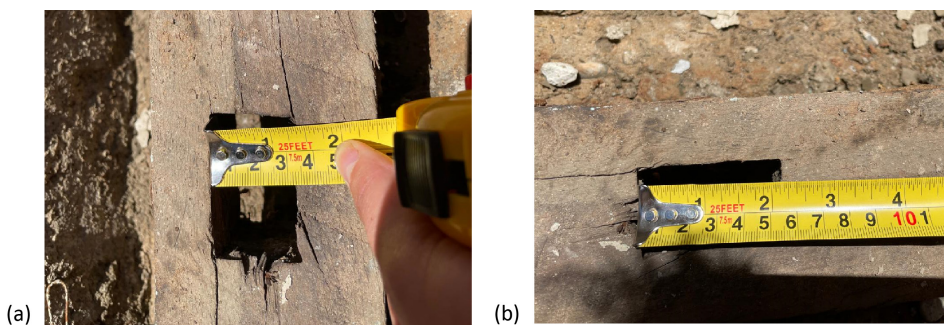


Fig. 80  
Corroboración de medidas ensamble caja y espiga encontrada en el Caso 4. Calle El Litre #1220: (a) espesor de la caja; (b) largo de la caja.

Además, se identificó la unión caja y espiga con espera en los dinteles de cada inmueble en estudio (ver Figura 81). Esta tipología del ensamble caja y espiga se diferencia debido a la presencia del labrado de una barbilla o espera, donde los hombros de la unión quedan definidos por un ángulo. Las medidas presentadas por González & Maino (2019) fueron corroboradas en terreno (ver Figura 82), y se pudo comprobar que el hombro inferior de la unión corresponde a un  $\frac{1}{4}$  del valor “h”, referente a la sección del elemento de madera de 4”x4”.

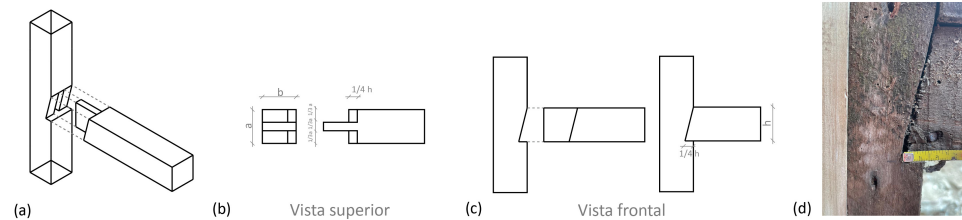
Fig. 81

Fotografías ensamble caja y espiga con espera encontrada en el Caso 1: Calle Higuera #179: (a) fotografía muro entramado de madera; (b) fotografía ensamble caja y espiga con espera.



Fig. 82

Ensamble caja y espiga con espera: (a) isométrico ensamble; (b) vista superior; (c) vista frontal; (d) unión medida en terreno encontrada en el Caso 5: Calle Ossandón #275.



### 3.1.4 ROL DENTRO DEL AMRCO Y COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La unión caja y espiga transmite las cargas entre los elementos que la componen a través de la superficie que rodea la espiga. La longitud de la espiga suele ser ligeramente menor a la profundidad de la caja, para evitar que los esfuerzos se concentren en la espiga. Las cargas laterales, como las inducidas por sismo, pueden afectar la integridad de la unión caja y espiga. Durante eventos sísmicos, la conexión disipa energía a través de su movimiento en respuesta a las nuevas solicitaciones externas. Las fuerzas horizontales en el plano de la unión generan principalmente esfuerzos a compresión, ya que la transmisión de la carga produce un esfuerzo cortante en la espiga y por compresión perpendicular a la fibra.

A pesar de que la unión caja y espiga es inicialmente capaz de soportar estas fuerzas, la naturaleza semirrígida de la madera y, por lo tanto, de la unión, puede hacer que, con el tiempo y la repetición constante de cargas, la conexión ceda. Esta cesión se manifiesta con la rotación de la unión, creando un ángulo de inclinación (Aslankaya, 2019). Eventualmente, esta rotación puede llevar a un fallo frágil de la unión, que podría resultar en la rotura o extracción de la espiga (ver Figura 83).

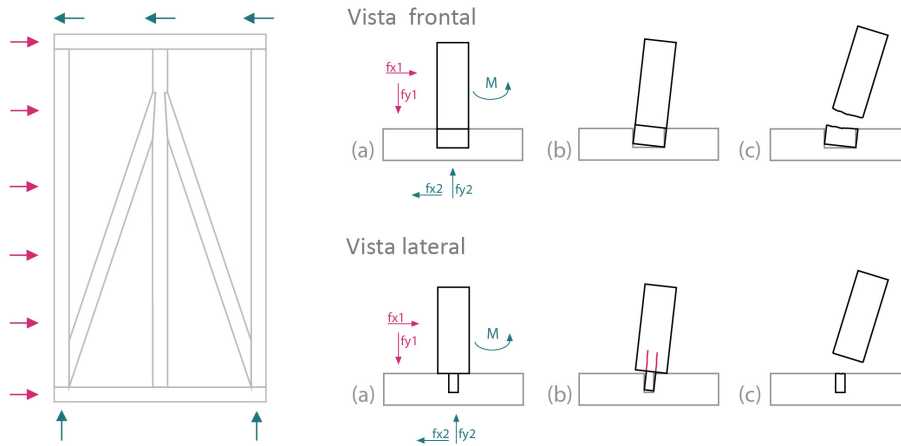


Fig. 83 Diagrama comportamiento ensamble caja y espiga ante cargas laterales.

### 3.1.5 ENSAMBLE EMBARBILLADO O DE ESPERA

El ensamble embarbillado, también conocido como ensamble de espera, es una conexión que se utiliza comúnmente en estructuras de techumbre (Branco & Descamps, 2015). Sin embargo, en la ciudad de Valparaíso, se evidenció el uso de esta unión en estructuras de muros para solucionar el encuentro entre las diagonales y los pies derechos (ver Figura 84a). En este tipo de ensamble, la diagonal presenta rebajes conocido como espera, donde se encajan los pies derechos. Por otra parte, en el encuentro superior, la diagonal tiene un corte en testa, conocido como barbilla o barbilla frontal (ver Figura 84b). Aunque existen diversas variaciones en la literatura, en los casos de estudio se encontró un solo ejemplar de este ensamble, presente en la estructura de un muro en el caso de Montealegre. En este caso específico, la diagonal sostiene la estructura de un vano de ventana y solo tiene una diagonal en esta dirección (ver Figura 84c).

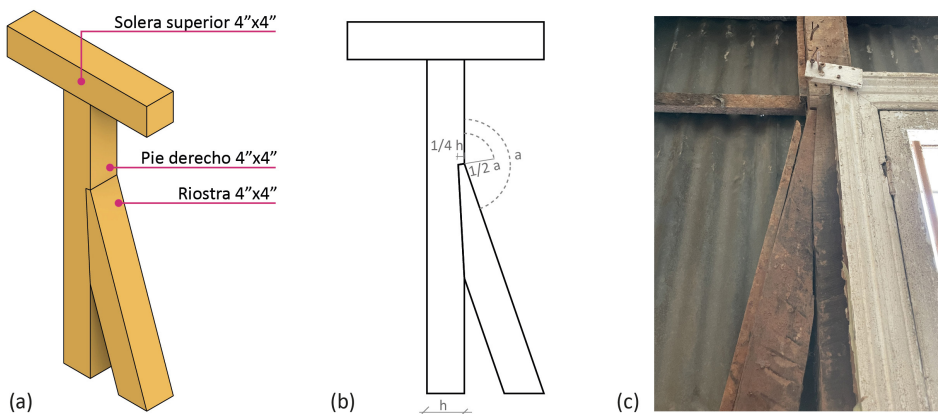


Fig. 84 Ensamble embarbillado frontal: (a) diagrama ensamble embarbillado frontal; (b) planimetría frontal unión; (c) fotografía embarbillado frontal encontrada en el Caso 3: Calle Monte Alegre #386.

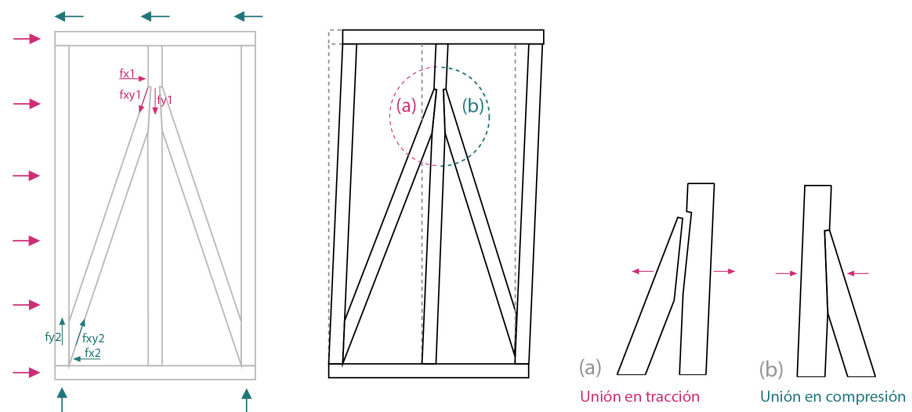
### 3.1.6 ROL DENTRO DEL MARCO Y COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

En las estructuras tradicionales de entramado de Valparaíso, el ensamble embarbillado frontal se encuentra presente en el elemento rigidizador de la estructura, es decir, la riostra o diagonal. Las riostras tienen la función de rigidizar los muros para que estos puedan resistir solicitaciones laterales en el sentido de su eje, como aquellas generadas por sismos y viento. Las cargas se transmiten mediante el contacto directo entre las caras adyacentes de ambos

elementos (riostras y pie derecho), generando tensiones de compresión en la muesca de la unión.

En general, no existe una lógica de ubicación y número de diagonales que se utilizan para rigidizar los marcos, y estas son puestas de manera aleatoria lo largo de las estructuras. No obstante, es común encontrarlas en números pares, formando arriostramientos en forma de V o V invertida, como se muestra en la Figura 85. Las cargas laterales provocadas por un sismo en el plano de la estructura afectan a ambas riostras, ya que el muro se desplaza en conjunto. En este caso, uno de los elementos diagonales trabaja a tracción, mientras que el contrario se comprime. Si la carga lateral persiste en el tiempo, ambos elementos pueden sufrir daños debido a este desplazamiento. Esto puede ocasionar que el elemento sometido a tracción se separe del pie derecho, mientras que el elemento comprimido puede experimentar compresión oblicua a la fibra y, por ende, la aparición de grietas en la riostra (ver Figura 85 a y b).

**Fig. 85**  
Diagrama comportamiento ensamble embarbillado frontal ante cargas laterales: (a) unión en tracción; (b) unión en compresión.



### 3.1.7 ENSAMBLE COLA DE MILANO

La unión cola de milano es un tipo de ensamble que fue difícil de observar e inspeccionar en los casos de estudios debido a la posición en la que se encuentra dentro de la estructura. Este tipo de ensamble se utiliza generalmente en el encuentro perpendicular entre soleras inferiores en forma de "t" o "L". Se sitúa en los extremos de una o de ambas soleras, y presenta un extremo labrado en forma trapezoidal y otro con una entalladura de la misma forma, logrando una trabazón efectiva a partir de su geometría (ver Figura 86). En el estudio de terreno realizado en la ciudad de Valparaíso, se registró solo una de estas uniones en la vivienda ubicada en el cerro Delicia, siendo una cola de milano ubicada en un segundo piso en el encuentro entre soleras inferiores, como se observa en la Figura 87. Los estudios de González & Maino (2019) y Jiménez (2014) mencionan el hallazgo de una variante de la unión tipo cola de milano, conocida como media cola de milano ciega en las edificaciones de Valparaíso.

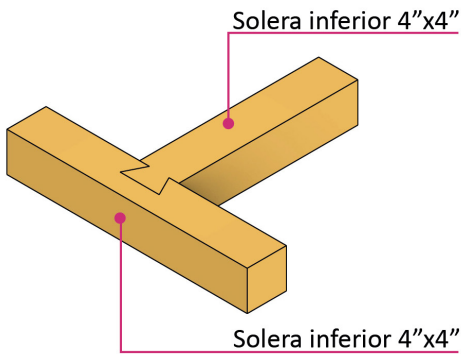


Fig. 86  
Ensamble cola de milano

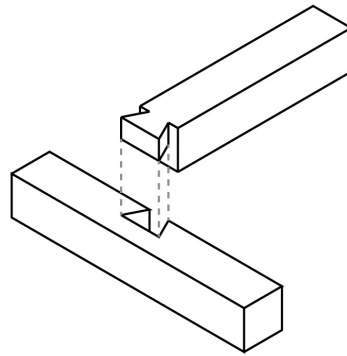
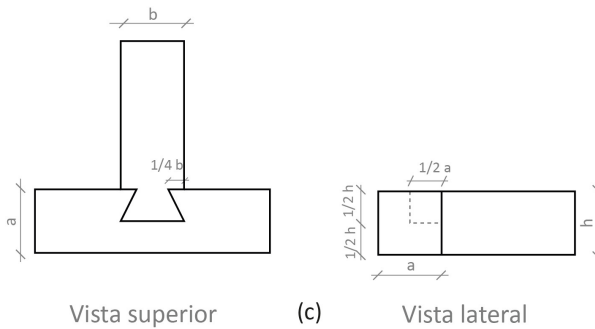


Fig. 87  
Planimetría ensamble cola de milano:  
(a) fotografía corroboración de medidas encontrada en el Caso 5: Calle Ossandón #275; (b) vista superior; (c) vista lateral.



(a)

(b)

(c)

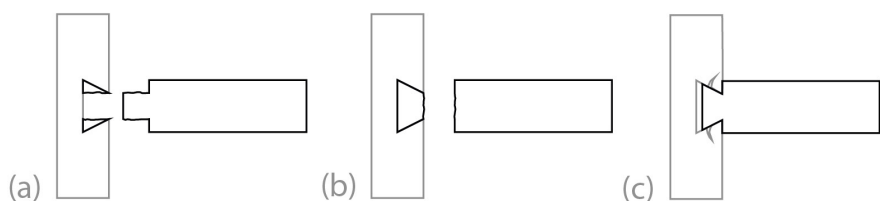
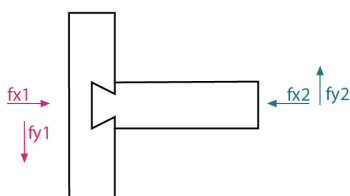
### 3.1.8 ROL DENTRO DEL MARCO Y COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La unión cola de milano es un ensamble capaz de transmitir cargas de tracción y compresión, aunque su capacidad portante es limitada. Las cargas se transmiten a través de la superficie que rodea la cola de milano. Tal como en las tipologías anteriores, este ensamble se puede ver afectado por cargas laterales provenientes de sismos y vientos, así como por cargas verticales provenientes del peso propio y la sobrecarga de las estructuras. En particular, las solicitaciones laterales de un sismo en el plano de la unión generan un esfuerzo cortante en la cola, además de tracción perpendicular a la fibra. Si la carga persiste en el tiempo, el ensamble podría experimentar un fallo frágil que podría provocar la rotura de la unión. De acuerdo con Arriaga et al. (2011), este fenómeno puede generar tres modos de fallo en el ensamble cola de milano, como se muestra en la Figura 88. La Figura 88a, muestra que la rotura de la cola de milano se puede producir en el centro, dejando dos triángulos calzados mientras el elemento se separa con el espacio en medio de la cola. En el caso de la Figura 88b, la cola se corta desde el cuello, dejando la cola separada de la solera. Finalmente, en la Figura 88c, se desplaza la cola de milano completa con la solera, provocando grietas en el otro elemento.

Fig. 88  
Diagrama de las formas de rotura en el ensamble cola de milano: (a) en el centro; (b) desde el cuello; (c) desplazamiento cola completa. (Arriaga et al., 2011).

Vista superior

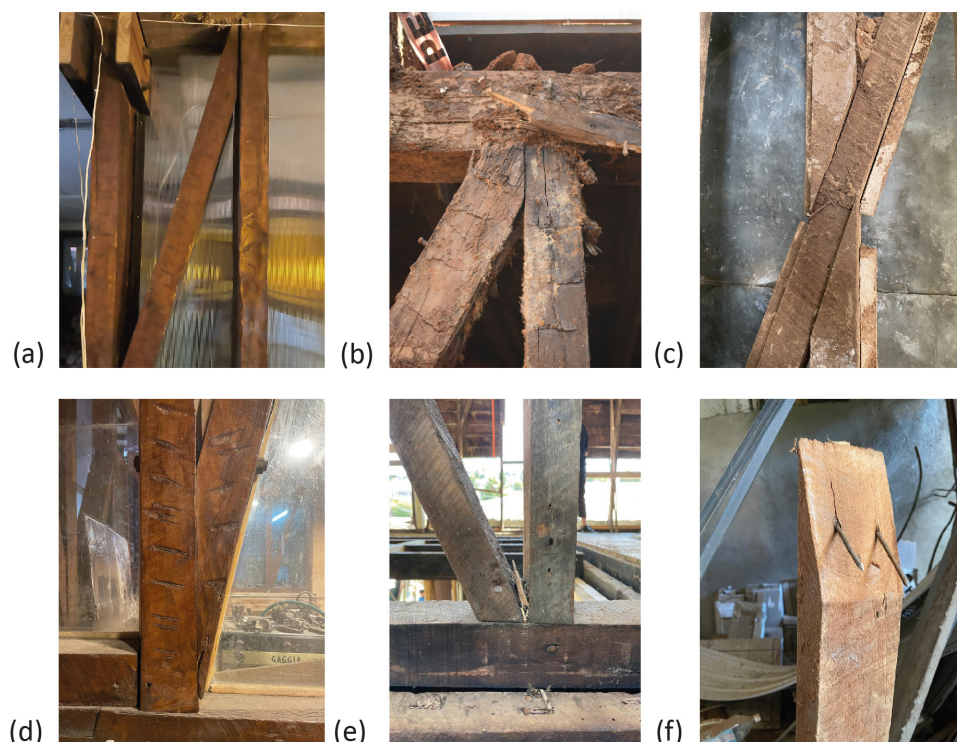
Formas de rotura



### 3.1.9 UNIONES POR CONTACTO

Las uniones por contacto son aquellas que, aunque presenten rebajes, no presentan calces ejecutados a través de labrados en la madera. En los edificios inspeccionados en el estudio de casos, se encontraron este tipo de uniones principalmente para en la conexión de las diagonales con los pies derechos, tanto en su extremo superior como inferior, tal como se muestra en la Figura 89.

En particular, se identificaron cuatro tipologías o variantes de uniones por contacto, como se observa en la Figura 89 a y b, muestran la conexión superior de una riostra con el pie derecho. En la Figura 89c, la unión entre la diagonal que corta un pie derecho, generando una conexión superior e inferior de contacto entre ambos elementos. La Figura 89 d y e, muestran la conexión entre la parte inferior de una riostra, a tope con la solera inferior. Todas las uniones mencionadas son afiatadas con el uso de clavos, ya sea de hierro forjado o industriales como se observa en la Figura 89f. Desde la inspección de los casos de estudio, se presume que las uniones por contacto en las diagonales reemplazar el uso del ensamble embarbillado frontal. Este cambio en las técnicas de ensamblaje puede atribuirse a una simplificación de los métodos de construcción o la mayor disponibilidad de materiales, como la aparición del clavo industrial, y de técnicas más modernas.



**Fig. 89**

Fotografías de uniones por contacto en la riostra; (a) encuentro superior con pie derecho; (b) encuentro superior con solera superior y pie derechos; (c) encuentro intermedio con pie derecho; (d) encuentro inferior con pie derecho; (e) encuentro inferior con solera inferior; (f) clavos utilizados para anclar ambos elementos.

## 3.2 ESTADO DE CONSERVACIÓN: PATOLOGÍAS Y LESIONES CARACTERÍSTICAS DE LOS MARCOS Y LAS UNIONES

En los casos de estudio inspeccionados en este trabajo fue posible observar diversas patologías y lesiones en los materiales y las estructuras que afectaban a las uniones carpinteras. Entre estas problemáticas, se destacan tres factores que contribuyen a la proliferación de daños mecánicos en las estructuras de entramado de madera. En primer lugar, la colonización desmedida y no controlada de los xilófagos; en segundo lugar, la presencia prolongada de humedad en el tiempo al interior de los recintos, causadas por infiltraciones de aguas lluvias u otras fuentes; finalmente, la incidencia de sismos y el daño acumulativo que presentan los sistemas constructivos. La combinación de estas tres fuentes de daño en los inmuebles conduce al detrimento generalizado de las estructuras, requiriendo ser sometidas a procesos de restauración, rehabilitación o reconstrucción. A continuación, se describen en detalle los daños observados en los casos de estudio, y, en particular, la afectación de las patologías y daños en las uniones carpinteras.

### 3.2.1 ATAQUE POR XILÓFAGOS

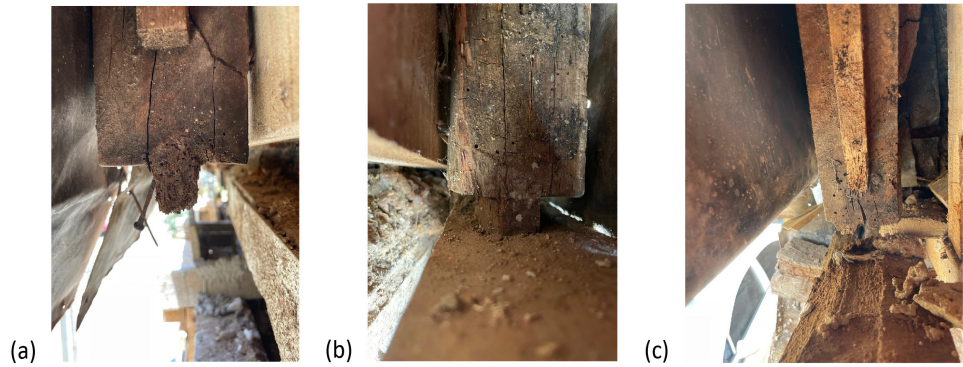
La infestación de xilófagos en las estructuras de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso es un fenómeno común. Según datos del (MINVU, 2018), al año 2004 ya existían en Valparaíso más de 56 focos y 5.000 viviendas dañadas por las termitas, que generan un daño acumulativo. El estudio estimó que entre las regiones de Santiago y Valparaíso las pérdidas en Viviendas al año 2000 fluctuaban entre 70 y 210 millones de dólares. Lo cierto es que las termitas pueden causar enormes daños en las estructuras de madera, generando daños de diversas magnitudes, que pueden implicar la pérdida parcial o total de las estructuras.

Las uniones carpinteras que afiatan los elementos de los entramados no quedan exentas de sufrir daños por ataques de termitas. En particular, aquellas que están más presentes y visibles en los entramados, como las uniones caja y espiga, o de contacto. Además, cuando las uniones forman parte o quedan en contacto con el entramado de piso o techumbre, son altamente vulnerables a sufrir infestaciones por estos insectos.

Durante la inspección de casos, se encontraron diferentes uniones con daños. En particular, en el Caso 4: Calle El Litre #1220, se evidenció el daño en una espiga de una unión caja y espiga, donde se observó la desintegración de la parte inferior de la pieza debido a la presencia de pequeños agujeros, como se observa en la Figura 90. En el caso de estudio, Caso 1: Calle Higuera #179 y el Caso 4: Calle El Litre #1220, se encontraron elementos estructurales gravemente dañados por termitas, como se puede observar en la Figura 91. En este caso, las piezas en la zona de las uniones se desintegraron en gran parte de su área debido al daño que producen los insectos que se alimentan de la madera y generan túneles para moverse en su interior. Es importante destacar que, aunque las primeras partes en desaparecer suelen ser los extremos del elemento, es decir, las uniones, las termitas no se detienen y pueden llegar a destruir la pieza completa, como se ilustra la Figura 92.

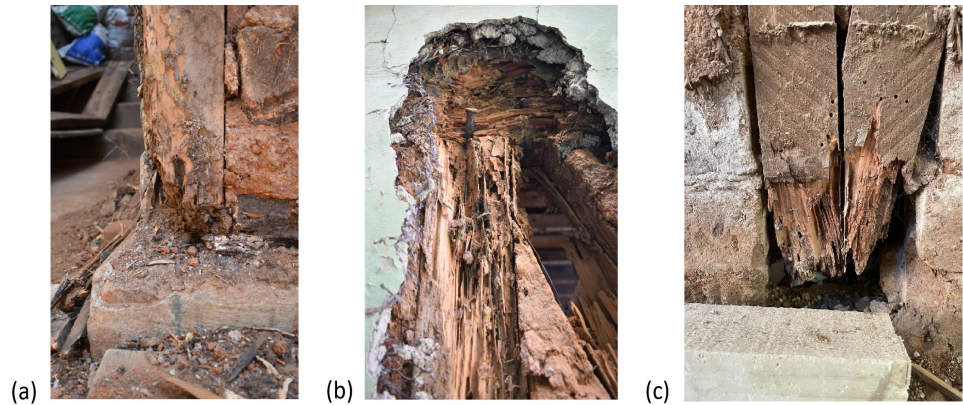
**Fig. 90**

Fotografías ensamble caja y espiga infestado por coleóptero encontradas en el Caso 4: Calle El Litre #1220.



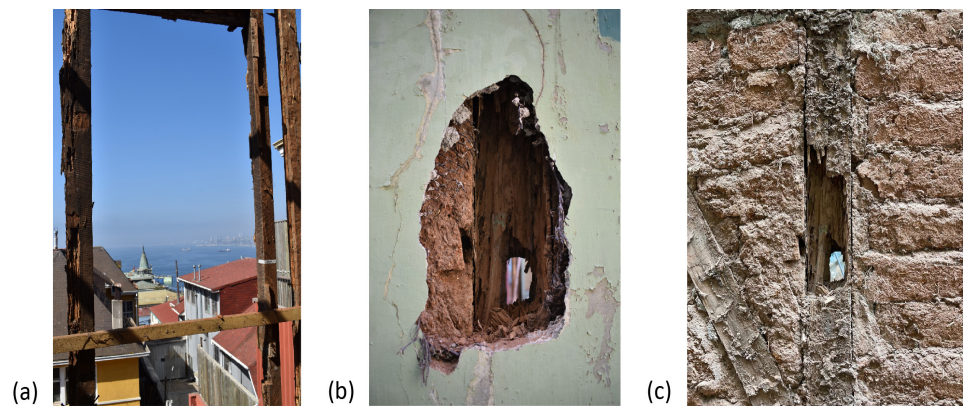
**Fig. 91**

Fotografías unión caja y espiga afectada por termitas encontrada en el Caso 1: Calle Higueras #179.



**Fig. 92**

Fotografías pie derecho infestado por termitas encontradas en el Caso 1: Calle Higueras #179.



### 3.2.1 DAÑO POR HUMEDAD

Otro importante agente patológico es la humedad, proveniente de diversos orígenes, como filtraciones desde artefactos, humedad por capilaridad, problemas en la construcción, soluciones erróneas de detalles constructivos, o la infiltración de aguas lluvias, debido a la falta de mantenimiento de canaletas y techumbre. Por ejemplo, en el Caso 5: Calle Ossandón #275, se infiltró agua lluvia debido al colapso y falta de mantenimiento de las canaletas, lo que provocó la desintegración de la solera inferior del primer nivel y, por ende, el asentamiento del inmueble. Por otro lado, en el Caso 1: Calle Higueras #179, se evidenció a la obstrucción de la salida de la baja de aguas lluvias con cemento, que se instaló para realizar una reparación en la calle con una solución incorrecta o poco compatible con la preexistencia, lo cual resultó en la misma patología del caso 5.

La madera expuesta a humedades se vuelve propensa a sufrir diversas patologías, como la presencia de hongos en las zonas afectadas, como se observó en el Caso 1: Calle Higueras #179, donde el entramado de piso junto con el entablado de madera experimentó un cambio en la coloración, observándose manchas blancas en la superficie (ver Figura 93b). Por otro lado, la desintegración de la madera debido a la infestación de termitas o al daño producido por la humedad, pueden generar el asentamiento progresivo de la vivienda, por ejemplo, cuando la pieza afectada es una solera inferior, como se observa en la Figura 93 a y c, en el Caso 5: Calle Ossandón #275 y Caso 1: Calle Higueras #179, correspondientemente.



Fig. 94  
Fotografía ensamble cola de milano traccionada encontrado en el Caso 5: Calle Ossandón #275.



Fig. 93  
Fotografías casos de humedad: (a) Caso 5: Calle Ossandón #275, encuentro entre solera y pie derecho afectado por humedad y termitas; (b) Caso 1. Calle Higueras #179, cielo afectado por humedad; (c) Caso 1: Calle Higueras #179, solera desvanecida por humedad y termitas.

### 3.2.3 DAÑO MECÁNICO

El daño mecánico de los elementos estructurales es común en los edificios tradicionales de entramado de madera. Durante la inspección de los casos de estudio se pudo observar daño de diversas naturalezas en las uniones. Por ejemplo, el asentamiento ocurrido en las viviendas de Ossandón e Higueras, provocó un efecto en cadena donde aparecieron diversas lesiones mecánicas en el armazón de madera y sus diferentes uniones carpinteras. Aquí se pudo observar una unión cola de milano a media madera dañada por efecto de la tracción ejercida en la unión, como se observa en la Figura 94. Con el descenso de la estructura, inició un proceso de separación, descalzando ambas partes de la conexión.

En el Caso 1: Calle Higueras #179, ubicado en el cerro Alegre, se pudieron observar la mayor cantidad de lesiones de este tipo, ya que el inmueble se encontraba en una etapa inicial de rehabilitación, y aún se encontraba a la vista la estructura sin intervenir. En particular, uno de los daños más graves que se observó en la estructura fue la desintegración completa de la solera inferior, que causó que la estructura completa se asentara hacia esa zona de la vivienda. Este asentamiento produjo la separación de la estructura en dos zonas, lo que derivó en que uniones carpinteras comenzaran a separarse debido a la tracción ejercida producto del asentamiento, tal como se muestra en la Figura 95 a y b, donde se observa el desnivelado del marco y la separación del dintel, respectivamente.



Fig. 95  
Fotografías separación de elementos de entramado de muro encontrados en el Caso 1: Calle Higueras #179: (a) muro desnivelado; (b) unión caja y espiga con espera traccionada producto del asentamiento de la vivienda.

Otro tipo de lesión mecánica presente en los casos de estudio son las provocadas por carga laterales, como los sismos, las cuales se manifiestan a través de grietas en las uniones carpinteras. Por ejemplo, en el Caso 1: Calle Higueras #179, se pudieron observar este tipo de daños en las uniones por contacto presentes en la conexión de las riostras diagonales con los pies derechos, donde se observó una grieta paralela a la fibra de la madera a través del clavo, debido a la compresión oblicua que ocurre en el elemento diagonal (ver Figura 96a). Por otro lado, en algunos ensambles de caja y espiga presentes en el mismo caso, se pudieron observar grietas verticales que seguían la misma línea que las aristas superiores de la espiga como se muestra la Figura 96a. Además, se observaron otro tipo de grietas los otros planos de los pies derechos, y, en algunos casos, la espiga sufrió daños por esfuerzos cortantes y hasta la extracción completa de la misma Figura 96b.

Fig. 96

Fotografías Caso 1: Calle Higueras #179: lesiones mecánicas: (a) uniones por contacto y ensamble caja y espiga; (b) ensamble caja y espiga producto de cargas laterales.



### 3.2.4 MANTENIMIENTO DE LOS MARCOS Y LAS UNIONES TRADICIONALES

Los edificios patrimoniales configurados con sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera en Valparaíso son constantemente amenazados por diversos factores como la presencia de plagas como las termitas, los daños ocurridos tras terremotos u otras catástrofes como incendio, actos de vandalismo, y la falta de mantenimiento, entre otros. En los barrios históricos, como el Almendral y el Barrio Puerto, existen numeras construcciones en condiciones precarias debido a la obsolescencia física y funcional de los bienes inmuebles. Esta problemática no solo se limita al plano de la ciudad, sino que se extiende a los diferentes cerros, siendo común encontrar viviendas con un valioso legado arquitectónico y constructivo, pero experimentando graves estados de deterioro, incluso en áreas de conservación histórica designadas por la UNESCO.

En la ciudad de Valparaíso existen diversos grupos de arquitectos y constructores enfocados en la rehabilitación de estructuras de entramado de madera, estos grupos abordan dichos procesos implementando diferentes técnicas, alineadas con los principios modernos de conservación. Dentro de estos grupos se encuentra Cíclica Bioconstrucción y Carpintería Taller 12, encargadas de la rehabilitación del Caso 5: Calle Ossandón #275, en este proceso se replican técnicas ancestrales para la reconstrucción y reparación de los marcos, las uniones carpinteras, y el relleno de adobillo. Por otro lado, la firma U6 arquitectos, encargados de la rehabilitación del Caso 1: Calle Higueras #179 persiguen el paradigma: conservar la mayor cantidad posible de material original de los inmuebles, tales como maderas, rellenos de adobillos, marcos de ventanas, planchas de zinc, etc.

Los procesos de rehabilitación de los entramados implican una serie de pasos lógicos. El primero, consiste en retirar el revestimiento exterior, ya sea plancha acanalada o pintura con yeso, dejando la capa de estuco de barro y los adobillos del relleno intactos, con el objetivo de retirarlos posteriormente, en caso de ser necesario, y reutilizar el material una vez que los trabajos en la estructura de madera estén terminados (ver Figura 97). Cuando el armazón está expuesto, se realiza una inspección completa de la estructura, identificando los elementos en buen estado y los deteriorados. Una problemática evidente es la infestación de xilófagos, por lo que se lleva a cabo una inspección de la lesión y la contaminación en la estructura para extraer las piezas afectadas, ya sea por trozos o elementos completos. En algunos casos, se realizan prótesis de las uniones carpinteras afectadas con estos elementos en buen estado (ver Figura 98). En situaciones en las que no es posible reutilizar las mismas maderas, se recurre generalmente a maderas comerciales como el pino Radiata. Sin embargo, no todos optan por reconstruir la unión carpintera; en su lugar, la reemplazan por el mismo elemento, sin unión carpintera, pero unido con clavos y tirafondos.

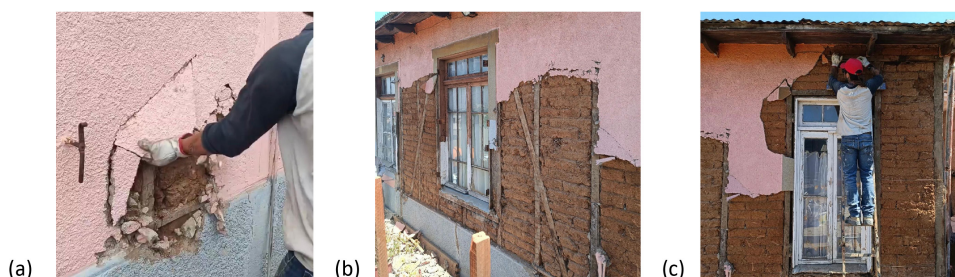


Fig. 97  
Fotografías trabajo la ruta de la tierra; (a) Retiro de revestimiento; (b) muro con retiro parcial del revestimiento; (c) técnica de retiro. Fuente: La ruta de la tierra.

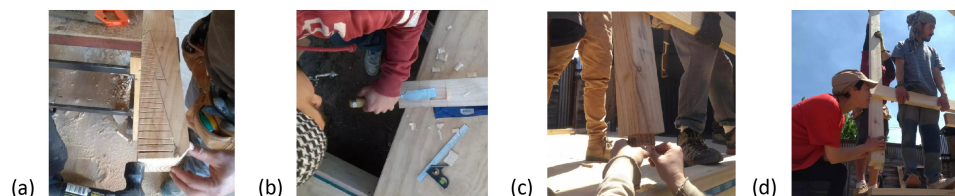


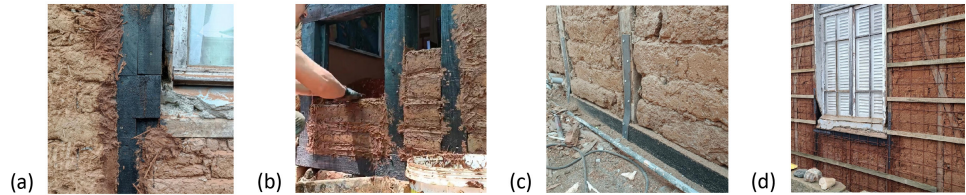
Fig. 98  
Fotografías trabajo de carpintería taller 12; (a) trazado de la unión en la madera; (b) tallado para unión rayo de júpiter; (c) montaje de un pie derecho con unión caja y espiga; (d) montaje estructura. Fuente: Carpintería taller 12, cíclicas bioconstrucciones.

El siguiente paso implica el reforzamiento de los elementos de madera; inicialmente, se aplica un líquido protector imprégnante, conocido como carbolíneo, principalmente en la parte inferior del armazón con el objetivo de prevenir la putrefacción de la madera que puede quedar en contacto directo con la humedad exterior o proveniente de las fundaciones (ver Figura 99a). En algunas ocasiones como menciona Dávila & Contreras (2022) , los adobillos se vuelven a fabricar utilizando el material extraído en la primera fase. Esto se logra mediante la creación de una mezcla de tierra en estado plástico con la incorporación de paja de trigo, que se vierte en moldes con tamaño de la pieza de adobillo deseada. Una vez listos, se suelta el molde y se colocan los adobillos se deja sobre una superficie plana al sol. Posteriormente se montan los adobillos entre pies derechos en el muro completo (ver Figura 99b). Después de esta etapa, en algunas ocasiones se emplean elementos comerciales como pletinas para crear estribos que ayuden a evitar la separación de las diversas uniones carpinteras (ver Figura 99c).

Finalmente, la terminación del muro generalmente se puede resolver con varias soluciones. La primera consiste en el uso de listones anclados al

**Fig. 99**

Fotografías trabajo la ruta de la tierra; (a) pie derecho con carbolíneo; (b) montura de adobillos en el tabique; (c) estribo sobre ensamble caja y espiga; (d) estructura de malla y listones para revestimiento. Fuente. La ruta de la tierra.



armazón de madera para luego instalar una plancha acanalada (ver Figura 99d). Otras opciones incluyen revestimientos con mezcla de tierra y paja, con yeso y pintura; o alambrado en diagonal con revestimiento de tierra, paja y sobre esto yeso y pintura; o malla con revestimiento de tierra y paja con yeso y pintura sobre la estructura de entramado de madera, ya sea con adobillos o sin ellos (ver Figura 100).

**Fig. 100**

Fotografías trabajo la ruta de la tierra; (a) revestimiento de barro y paja sobre malla; (b) puesta de plancha acanalada sobre listones. Fuente. La ruta de la tierra.



Sin embargo, no todas las intervenciones en las viviendas resultan en una recuperación o puesta en valor de la arquitectura y su sistema constructivo. En muchas ocasiones, la falta de conocimiento sobre la importancia de esta técnica constructiva lleva a los propietarios a tomar decisiones extremas, como lo fue el Caso 4: Calle el Litre #1220, donde el mandante decidió eliminar la estructura de madera, sin importar el estado de conservación de esta, y reemplazarla por muros de hormigón (ver Figura 101). En otros casos, la preocupación por la respuesta de estos inmuebles frente a catástrofes naturales, como los sismos, conduce a intervenciones excesivas de refuerzo, como en el Caso 2: Calle Almirante Montt #107 #109, donde la preocupación del propietario llevó a una intervención de acero exterior. Aunque posteriormente se retiró parcialmente debido a su sobredimensionamiento, aún quedan partes de esta en las estructuras de muro a la vista, como se observa en la Figura 102.

**Fig. 101**

Fotografías Caso 4: Calle El Litre #1220: proceso de desmantelamiento, por cambio de materialidad del sistema constructivo.

**Fig. 102**

Fotografías caso 2: Calle Almirante Montt #107 #109: vestigios de reforzamiento excesivo realizado a inmueble patrimonial, por falta de desconocimiento del sistema constructivo.





# CAPÍTULO 4: PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DE SOLUCIONES DE REFORZAMIENTO PARA UNIONES CARPINTERAS

## 4.1 MARCO TEÓRICO

El autor Asimow (1962) es el precursor de la implementación de una metodología de diseño que propone una perspectiva ingenieril en los procesos de diseño con el propósito de guiar de manera sistemática la búsqueda de soluciones en a través de la investigación. Mediante la metodología denominada la “morfología del diseño”, el autor propone un proceso creativo sistemático que se divide que aborda una etapa primera de creación y definición del producto, seguidos por una fase secundaria derivada de un ciclo producción-consumo. La morfología del diseño (ver Figura 103) está compuesta por tres etapas conocidas como (i) diseño conceptual, (ii) diseño

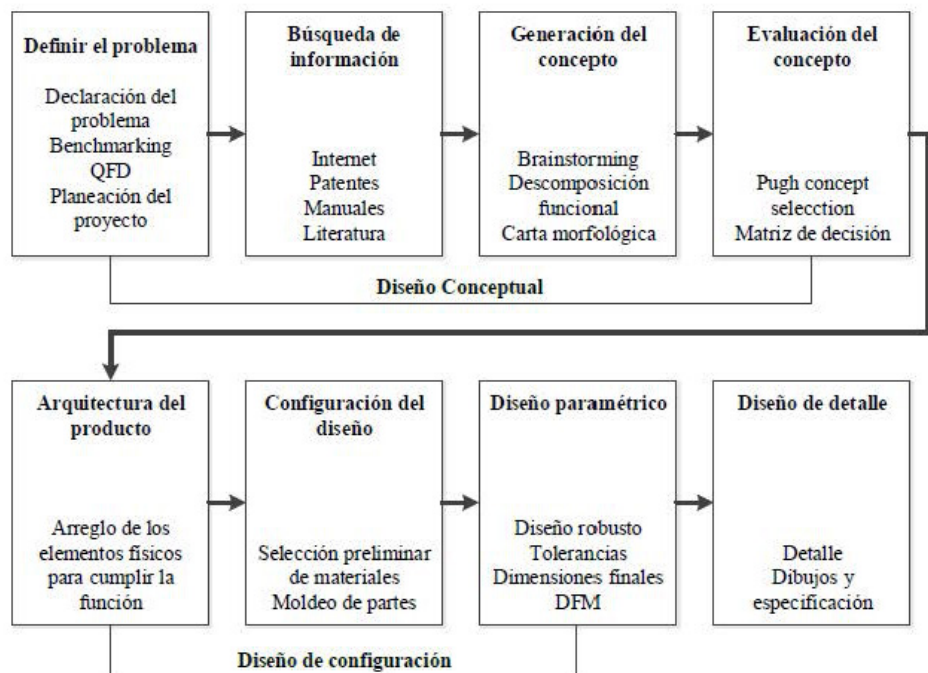


Fig. 103 Diagrama metodología denominada “Morfología del diseño”. (Asimow, 1962).

preliminar y (iii) diseño detalle. Estas etapas están dedicadas específicamente a un proceso sistemático y creativo para el desarrollo de nuevos productos o mejoras de aquellos que ya existan en el mercado.

En esta investigación se adoptó este método con el objetivo de encontrar y generar soluciones de reforzamiento para las uniones carpinteras que son objetos de investigación, basándose en cuatro constantes conocidas como la búsqueda de información, análisis, síntesis y evaluación.

El diseño conceptual es el punto inicial en el método de la morfología del diseño, el cual da comienzo a la etapa de anteproyecto mediante una secuencia lógica de actividades orientadas en la búsqueda de posibles soluciones de diseño. En esta investigación, la búsqueda se centra en la optimización de tres ideas que satisfagan tanto las exigencias mecánicas como formas arquitectónicas de los diferentes tipos de uniones carpinteras para el diseño

#### **4.2 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE SOLUCIONES DE REFORZAMIENTO PARA UNIONES CARPINTERAS**

El presente estudio propone una aproximación metodológica mediante enfoques cualitativos y semicuantitativos para abordar procesos de diseño de soluciones de reforzamiento para uniones carpinteras, aplicando métodos de resolución de problemas de inventiva y análisis de las necesidades específicas de las uniones carpinteras. La propuesta metodológica se desarrolla y presenta en este apartado de manera aplicada, a través del estudio de tres tipos de uniones que se reconocen como las más representativas en la configuración de muros de entramado de madera en los edificios tradicionales de la ciudad de Valparaíso, Chile. Estas son el ensamble caja y espiga, el ensamble embarbillado frontal y el ensamble tipo cola de milano.

La metodología propuesta corresponde a una readaptación de la primera fase de la “morfología del diseño” de Asimow (1962), denominada diseño conceptual. Dentro de las herramientas que propone Asimow (1962) se destacan los procesos para la formulación del problema, la evaluación comparativa o benchmarking, el despliegue de la función de calidad (QFD) y la carta morfológica. Más recientemente, los autores Elizondo (2015), Rosas (2017) y Steinmeyer (2015) han propuesto versiones reformadas de la “morfología del diseño” de Asimow (1962), adaptada a las necesidades actuales del ámbito del diseño de productos, e incluyendo otras herramientas para la búsqueda de soluciones como la caja negra y transparente y el método de resolución de problemas TRIZ.

El presente trabajo adopta la secuencia de etapas y herramientas que establece Rosas (2017), caracterizada por estar segmentada en cuatro etapas: (i) definición del problema, (ii) análisis funcional, (iii) generación de conceptos, y (iv) selección del concepto. Aunque el método original incluye numerosas subetapas, en esta investigación se simplifica la metodología al definir un mayor número de etapas y evitar el uso excesivo de subetapas, lo que resulta en una estructura más directa y fácil de aplicar. La metodología propuesta en esta investigación consta de nueve etapas (ver Figura 104):

La primera etapa, (i) Definición de la Problemática, está asociada a la identificación de las características que debe tener el diseño del producto que se desea desarrollar. En esta fase se definen los objetivos, restricciones y funciones que deben guiar los lineamientos del diseño. Estos objetivos se segmentan posteriormente en cuatro categorías distintas.

Una vez definidas estas categorías, se inicia la segunda etapa denominada (ii) Comparación de Pares (Saaty, 1990). El propósito de esta etapa es ponderar los objetivos y las categorías definidos en la etapa anterior. Esta ponderación se realiza en función de las categorías definidas por Elizondo (2015); Rosas (2017) y Steinmeyer (2015), con los objetivos establecidos a partir de las necesidades que la solución de refuerzo debe satisfacer. Se establece un grado de importancia entre cada uno de los objetivos en base a una escala predeterminada (Tabla 6).

La tercera etapa, denominada (iii) Diagrama de Caja (Jones, 1970), aborda un análisis de las condiciones que afectarán al producto a diseñar. El análisis comienza con un diagrama de caja negra, que muestra las condiciones externas que influirán en el producto, seguido de un diagrama de caja transparente, que analiza lo que le sucede al producto cuando se ve afectado por estas condiciones externas.

La cuarta etapa, titulada (iv) Evaluación Comparativa, busca generar un estudio de los productos similares al que se desea diseñar, en base a los objetivos planteados en la primera etapa de la metodología (i) Definición de la Problemática. Esto permite el análisis de las ventajas y desventajas que presenta cada producto en el mercado.

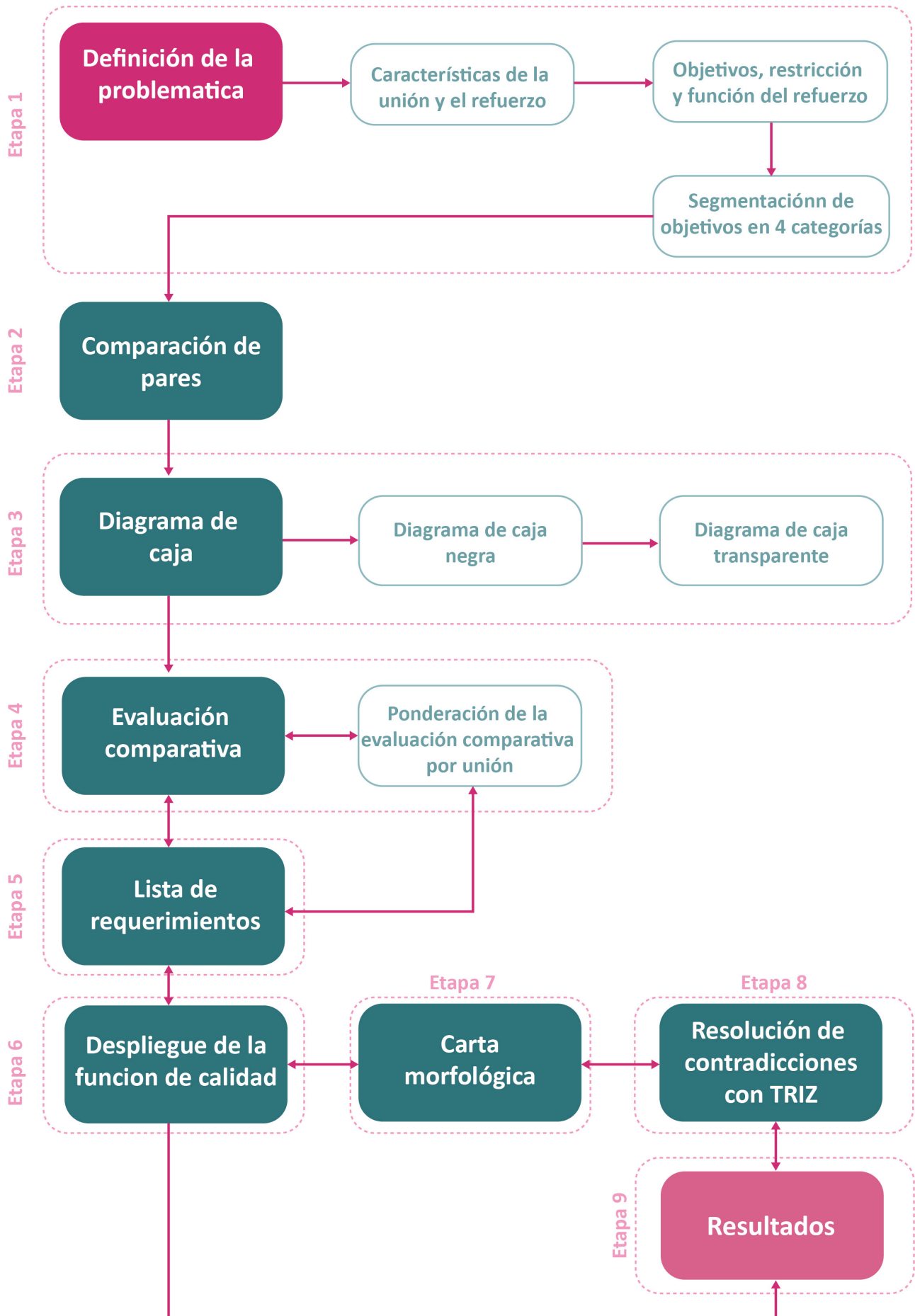
La quinta etapa, (v) Lista de requerimientos, reúne parámetros cualitativos y cuantitativos para definir el diseño de producto, basado en seis áreas principales como: (i) geometría; (ii) capacidad de carga; (iii) comportamiento estructural; (iv) seguridad; (v) mantenimiento; y (vi) costos.

La sexta etapa (vi), Despliegue de la Función de Calidad (QFD) (Tamayo & Bosch, 2004), incluye el desarrollo de una matriz-diagrama, que integra todos los pasos previos, con el objetivo de evaluar las relaciones entre cada etapa y encontrar contradicciones o problemas en el diseño.

En el caso de presentar contradicciones o problemas en el diseño de producto, se continua con la séptima etapa (vii), Resolución de contradicciones con TRIZ (Altshuller, 2002), la cual a través de una matriz propone soluciones para las problemáticas asociadas al diseño.

La matriz de la etapa anterior dará directrices para continuar con la etapa (vii) Carta Morfológica, donde se llevará a cabo una lluvia de ideas o brainstorming, con el objetivo de recapitular diversas posibilidades para la formulación de conceptos o ideas de solución de refuerzo para cada tipo de unión carpintera en estudio

A continuación, se explicarán en detalle cada una de las etapas que componen la metodología propuesta y su aplicación hacia el diseño de las soluciones de reforzamiento propuestas en esta investigación.



### 4.2.1 DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La primera etapa de la metodología comienza con la definición del problema, asociado a los requerimientos y necesidades de reforzamiento para cada tipología de unión carpintera, con el objetivo de generar un enunciado descriptivo, donde se mencionen los atributos y requerimientos necesarios para conceptualizar una idea de refuerzo para las uniones. En este proceso se toma como referencia la carta Principios que deben regir la conservación de las estructuras históricas en madera emitida por el ICOMOS en el año 1999 (ICOMOS, 1999), considerados como lineamientos cruciales para la preservación y restauración de estructuras históricas de madera. Asimismo, se consideran la geometría de las diferentes uniones, su funcionamiento y las patologías mecánicas más comunes que se presentan en ellas. Lo último, se determinó desde diversa información recabada en la literatura y a través de la inspección de diferentes casos de estudio en Valparaíso. En esta etapa se pretende establecer objetivos, funciones y restricciones para dar inicio al proceso creativo de diseño de soluciones de refuerzo para las uniones carpinteras.

Las uniones carpinteras son las encargadas de transmitir las cargas entre los elementos que conforman un sistema constructivo de entramado de madera, manteniendo y asegurando la integridad de los elementos de madera durante su uso (Yu et al., 2022). Además, desempeñan un rol fundamental dentro de los armazones de madera, ya que representan el principal mecanismo disipador de energía durante un terremoto, por lo cual, muchas veces son las primeras partes en fallar (Poletti, 2013). Tal como han demostrado los estudios de Abolmaali et al., (2006), Cardone et al., (2019), Chen et al., (2016a), y Xue et al., (2021), la implementación de soluciones de reforzamiento estructural ayuda a mejorar la capacidad de carga y de disipación de energía de las uniones, además de evitar la separación de las piezas.

La Tabla 3 muestra las características de las uniones que se estudian para ser reforzadas en esta investigación. En el primer caso, el ensamble caja y espiga, la transmisión de cargas ocurre entre las columnas y las vigas, respectivamente. En particular, en este trabajo se estudiará la unión que se utiliza para conectar los pies derechos a las soleras en los muros tradicionales de entramado de madera en los edificios de Valparaíso, y que desempeña papel crucial como disipador de energía en caso de sismos, absorbiendo y reduciendo la energía a través de su movimiento. En este caso, cuando la unión recibe una carga lateral, como sucede en los sismos, se produce una rotación de la columna. Sin embargo, cuando esta carga persiste debido a terremotos prolongados o réplicas, se generan esfuerzos cortantes en la espiga y compresión perpendicular a la fibra, lo que puede ocasionar la separación de ambos elementos (Arriaga et al., 2011).

Por otro lado, en la misma tipología constructiva, la junta de embarbillado frontal se emplea para conectar los pies derechos con las riostras diagonales. El comportamiento de esta unión bajo cargas laterales dependerá de su posición y orientación dentro del entramado de madera. De esta manera, la unión puede ser sometida a tracción o compresión, experimentando

**Fig. 104**  
Diagrama de flujo de la metodología propuesta para la creación de un concepto de refuerzo.

compresión oblicua y tensiones de cizalle en el talón de la riostra (Arriaga et al., 2011; Palma et al., 2010).

Por último, la unión tipo cola de milano se utiliza para conectar elementos perpendiculares en el entramado, solucionando encuentros entre soleras o vigas. Este ensamble cumple una función importante como disipador de energía durante un sismo, ya que absorbe la energía que recibe, reduciendo la cantidad de energía que debe ser absorbida por la estructura en su conjunto. Sin embargo, cuando la carga lateral persiste debido a terremotos prolongados o réplicas (sismos de menor intensidad), la unión puede experimentar deformación por compresión perpendicular y tracción, llegando incluso a la rotura y separación de ambos elementos debido a las tensiones de tracción perpendicular a la fibra (Arriaga et al., 2011).

En adelante, no se diferenciarán las uniones, sino que se establecerán los mismos parámetros de evaluación dada las similitudes mencionadas. Ya que, una vez definida las características de cada unión carpintera, así como el papel que desempeñan dentro de la estructura según su posición y geometría, se observa que, a pesar de poseer diferencias formales, estructurales y funcionales, las tres tienen similitudes: ser disipadores de energía y, al fallar por aplicación de carga lateral, ocurre la separación de los elementos que las componen. Esto sugiere que los refuerzos específicos para cada unión deben satisfacer las mismas necesidades: fortalecer la conexión de los elementos que componen las uniones, mejorar la disipación de energía y la capacidad de carga de la unión. Esta problemática será considerada en la metodología para la búsqueda de conceptos o ideas para el diseño de los reforzamientos.

A partir de este análisis se llevó a cabo el estudio de las necesidades que el refuerzo debería satisfacer para las uniones (ver Tabla 4). En este paso, se definen objetivos, restricciones y funciones de la solución buscada, con el fin de guiar las exigencias que deben cumplir los reforzamientos para las uniones carpinteras (Elizondo, 2015; Larraín, 2015; Steinmeyer, 2015). Los objetivos se formulan bajo las condiciones que establece ICOMOS (1999) considerando

Tab. 3  
Características de las uniones carpinteras tradicionales de los entramados de madera de la ciudad de Valparaíso.

Características de la unión			
Ensamble	Caja y espiga	Embarbillado frontal	Cola de milano
<b>Función de la unión</b>	Transmite cargas entre pie derecho y solera	Transmite cargas entre pie derecho y riostra	Transmite carga entre soleras
<b>Rol durante un sismo</b>	Disipador de energía	Disipador de energía	Disipador de energía
<b>Tipo de deformación</b>	Esfuerzos cortantes en la espiga y compresión perpendicular a la fibra	Compresión oblicua y tensiones de cizalle en el talón de la riostra	Deformación por compresión perpendicular y tensiones de tracción perpendicular a la fibra
<b>Forma de actuar bajo cargas externas</b>	Rotan cuando se le aplica carga lateral	Se tracciona o comprime dependiendo de la dirección de la carga	Capaz de transmitir fuerzas de tracción y compresión
<b>Tipo de fallo de la unión</b>	Rotura y separación de la espiga	Separación de los elementos	Rotura y separación de la cola de milano

como parte fundamental del diseño del refuerzo (i) tenga dimensiones moderadas, (ii) sea técnicamente removible, y que no comprometa la arquitectura del bien inmueble. Además, se busca que (iii) sea liviano, (iv) que no cause daño en la unión, (v) que haga uso de materiales compatibles con la madera y (vi) que proteja la unión de separación de elementos. También se consideran la (vii) factibilidad de instalación en edificios existentes, (viii) el bajo costo de producción y (ix) la mantención.

Las restricciones, al igual que los objetivos, se definen siguiendo los principios establecidos en la carta del ICOMOS (1999). En concreto, se consideran como restricciones que (i) el refuerzo no exceda el tamaño de la sección de los elementos de madera, (ii) que no se haga uso de adhesivos, y (iii) que no sobre rigidice la unión, ya que la disipación de energía de la junta depende principalmente de la fricción entre los elementos de madera que componen (Yu et al., 2022). Estas restricciones tienen como objetivo aplicar métodos para la protección y conservación de las estructuras históricas en madera, respetando y resignificando su valor y su significado cultural.

Por último, en la categoría de “función” (ver Tabla 5), se consideran las funciones que deben cumplir el refuerzo de acuerdo con las solicitudes de las uniones descritas en la Tabla 3 y en la Sección 2.4 Soluciones de reforzamiento de uniones carpintera: revisiones técnicas tradicionales y de vanguardia. En particular, y de acuerdo con Arriaga et al. (2011) y otros autores (Dai et al., 2022; Yu et al., 2022), se busca que el reforzamiento propuesto tenga la función de asegurar o afianzar las piezas, impidiendo el desarme de la unión carpintera y otorgándole al refuerzo la función de evitar su separación. Autores como Dai et al. (2022); Poletti (2013); Xue et al. (2020); Yu et al. (2022); Zhao et al. (2019) y Zhou & Yan (2015) estipulan que las soluciones de refuerzo se utilizan con el fin de mejorar la disipación de energía de las uniones carpinteras y aumentar la capacidad de carga mejorando el comportamiento estructural de la junta (Palma et al., 2010; Parisi & Piazza, 2000; Tannert, 2016; Tannert & Lam, 2009; Wu et al., 2019).

Tab. 4  
Características, consideraciones y objetivos para el diseño de reforzamientos según el tipo de unión carpintera.

Una vez establecido los objetivos, funciones y restricciones necesarios para diseñar los refuerzos de las uniones (ver Tabla 4) se subdividen los

Consideraciones para el diseño del refuerzo para las uniones		
Objetivos	Restricciones	Función
Técnicamente removible	No debe exceder la sección de la madera	Mejorar la capacidad de disipación de energía
Fácil de instalar		
Liviano		
Materialidades compatibles con la madera	No debe ser fijo o utilizar adhesivos	Capaz de evitar la separación de las piezas
Proteger la unión de la separación		
No cause daño en la unión		
Bajo costo de producción	No debe sobre rigidizar la unión	Capaz de aumentar la capacidad de carga
Bajo costo de mantención		
Dimensiones moderadas		

1	Desempeño	2	Seguridad	3	Costos	4	Apariencia
1.1	Técnicamente removible	2.1	Proteger la unión de la separación	3.1	Bajo costos de producción	4.1	Dimensiones moderadas
1.2	Fácil de instalar	2.2	No cause daño en la unión	3.2	Bajo costos de mantención		-
1.3	Liviano		-		-		-
1.4	Materialidades compatibles con la madera		-		-		-

objetivos en cuatro nuevas categorías (ver Tabla 5) (propuestas por Elizondo (2015) con el objetivo de jerarquizar su importancia.

Tab. 5 Segmentación de objetivos.

#### 4.2.2 COMPARACIÓN DE PARES

A partir de la clasificación de los objetivos en las categorías de desempeño, seguridad, costos y apariencia, se utilizó la metodología de comparación de pares, conocida como Pairwise Comparison Chart, desarrollada por Thomas Saaty (1990). El propósito de esta aplicación es ordenar y jerarquizar de manera cuantitativa, mediante la ponderación de pesos relativos, cada uno de los objetivos establecidos. La herramienta consiste en una matriz de comparación por pares en la cual se distribuyen las categorías y, posteriormente, los objetivos pertenecientes a cada una de ellas para compararlos entre sí y establecer un grado de importancia entre cada uno de los objetivos en base a una escala predeterminada.

Si bien la escala definida por Thomas Saaty (1990) asigna a los números enteros del 1 al 10 un valor cualitativo y a los números fraccionarios una relación inversa a los enteros, en este caso se utiliza la escala propuesta por Elizondo (2015), en la que a cada par de categorías se compara y se le asigna un valor de acuerdo con la siguiente escala: 1 para objetivos de relevancia equivalente, y 5 y 10 para indicar que un objetivo es más importante y mucho más importante que su par, respectivamente. También se utilizan valores fraccionarios como 0.1 y 0.2 para ponderar condiciones menos importante y mucho menos importante, respectivamente.

Primero, se evalúan las categorías de desempeño, seguridad, costos y apariencia, como se detalla en la Tabla 5. A continuación, en la Tabla 6, se asignan valores a cada casilla de la matriz para comparar la importancia de una categoría sobre otra. Una vez completada la matriz con estos valores, se suman los puntajes de cada fila para obtener un puntaje total por categoría. Este puntaje se divide por la suma total de puntajes, lo que permite calcular el peso relativo, que indica la importancia de cada categoría en comparación con las demás (ver Tabla 6).

Después de jerarquizar cada categoría, se evalúan los objetivos correspondientes a cada una, con el fin de priorizar aquellos que son más relevantes. En las Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 se repite el proceso de valoración dentro de las casillas de la matriz para obtener un peso relativo. Sin

embargo, en estas tablas también se añade el valor absoluto, que se obtiene multiplicando el puntaje total del objetivo por el peso relativo de la categoría calculado en la Tabla 6.

Los resultados obtenidos jerarquizan las categorías de mayor importancia en la Tabla 6, siendo la seguridad el objetivo más importante, seguido por la apariencia, el desempeño y, finalmente los costos. En cuanto a la jerarquización de cada característica dentro de estas categorías, en la categoría de desempeño (ver Tabla 7) tiene mayor importancia que el refuerzo sea liviano, mientras que la facilidad de instalación posee la menor importancia. En la categoría de seguridad (ver Tabla 8), la característica de proteger la unión de la separación tiene mayor importancia sobre la de no causar daño. En tercera costos (ver Tabla 9) tiene mayor importancia el bajos costo del producto frente a al costo de mantenimiento. En la categoría “apariencia” (ver Tabla 10), la característica dimensiones moderadas obtiene el valor 1 al ser el único objetivo de la categoría.

Tab. 6  
Comparación de pares entre categorías.

Tab. 7  
Comparación de pares: Entre objetivos de la categoría desempeño.

Tab. 8  
Comparación de pares: Entre objetivos de la categoría seguridad

Tab. 9  
Comparación de pares: Entre objetivos de la categoría costos.

Crterios		1	2	3	4	Total	Peso Relativo
Desempeño	1	1	0,2	5	0,2	6,4	0,16
Seguridad	2	5	1	10	5	21	0,53
Costos	3	0,1	0,2	1	0,2	1,5	0,04
Apariencia	4	5	0,1	5	1	11,1	0,28

Escala	
1	Igual importancia
5	Más importante
10	Mucho más importante
0,2	Menos importante
0,1	Mucho menos importante

1. Desempeño (0,16)							
Criteriono	1.1	1.2	1.3	1.4	total	Peso Relativo	Peso absoluto
1.1	1	5	0,2	0,1	6,3	0,18	0,03
1.2	0,2	1	0,2	0,1	1,5	0,04	0,01
1.3	10	5	1	0,2	16,2	0,46	0,07
1.4	5	5	0,1	1	11,1	0,32	0,05

1	Desempeño
1.1	Técnicamente removible
1.2	Fácil de instalar
1.3	Liviano
1.4	Materialidades compatibles con la madera

2. Seguridad (0,52)					
Criteriono	2.1	2.2	Total	Peso relativo	Peso absoluto
2.1	1	5	6	0,83	0,44
2.2.	0,2	1	1,2	0,17	0,09
<b>Total</b>			7,2	1	0,53

2	Seguridad
2.1	Proteger la unión de la separación
2.2	No cause daño en el elemento de madera

3. Costos (0,04)					
Criteriono	3.1	3.2	Total	Peso relativo	Peso absoluto
3.1	1	5	6	0,83	0,03
3.2	0,2	1	1,2	0,17	0,01
<b>Total</b>			7,2	1	0,04

3	Costos
3.1	Bajo costos de producción
3.2	Bajo costos de mantención

4. Apariencia (0,28)				
Criterio	4.1	Total	Peso relativo	Peso absoluto
4.1	<b>1</b>	1	1,00	0,28
<b>Total</b>		<b>1</b>	1,00	0,28

4	Apariencia
4.1	Dimensiones moderadas

### 4.2.3 MÉTODO DE CAJA

De manera correlativa, la metodología propuesta considera un análisis de la problemática con el objetivo de buscar y establecer una estructura de funciones óptimas para determinar el correcto funcionamiento de las soluciones de refuerzo para cada tipo de unión carpintera. El autor Jones (1970) expone dos métodos de diseño que integran formas distintas de analizar interrelaciones que en los procesos de diseño de productos. La primera responde al diagrama de caja negra, proyectado desde el subconsciente del diseñador, el cual no puede ser analizado en profundidad ya que solo muestra aquello que entra y sale de la caja. Este tipo de diagramas sirve para entender a modo general el funcionamiento del producto que se desea crear, donde solo se observan los flujos que entran en el sistema, y como estos al entrar en la caja negra se convierten en acciones. El diagrama de caja negra considera el proceso mental que el diseñador ha seguido para lograr sus objetivos, sin embargo, no es claro ni evidente.

Por otro lado, en la segunda técnica, conocida como diagrama de caja transparente o de cristal, los procesos ocultos en el diagrama de caja negra se vuelven visibles, logrando mostrar el proceso completo que recorren los flujos desde que entran en el sistema hasta que estos salen, integrando criterios de análisis del problema y estrategias adoptadas. Al emplear estas técnicas, se logra entender la relación entre las entradas y salidas del sistema, que representan las demandas y solicitudes del diseño, respectivamente. En esta investigación, se implementarán los diagramas de caja negra y transparente para esclarecer las necesidades de las soluciones de reforzamiento que se busca diseñar.

En primera instancia, se aplicó el método de la caja negra, donde se analizaron las entradas y salidas del sistema que determina el diseño de soluciones de refuerzo para las uniones carpinteras. El diagrama de flujo propuesto (ver Figura 105) considera como información de entrada las solicitudes estructurales que deben satisfacer las uniones, tales como acciones externas y/o cargas a las que están sometidas las uniones, como las cargas laterales o sísmicas, y verticales, asociadas al peso propio y a las sobrecargas de uso en las estructuras. De esta forma, se establecen las necesidades mínimas que deben satisfacer los refuerzos para funcionar de manera eficaz, manteniendo o aumentando la capacidad de carga y la posición de las uniones ante esfuerzos por cargas laterales y verticales impuestas a la estructura. Este diagrama no esclarece el “cómo” se llegan a los resultados de salida, que es lo que se debe resolver con la propuesta de diseño.

En segundo lugar, se aplicó el modelo de “caja transparente”, esbozado en la Figura 106. En este sistema se integran las funciones y subfunciones básicas que deben satisfacer los refuerzos estructurales en las uniones

Tab. 10  
Comparación de pares: Entre objetivos de la categoría apariencia.

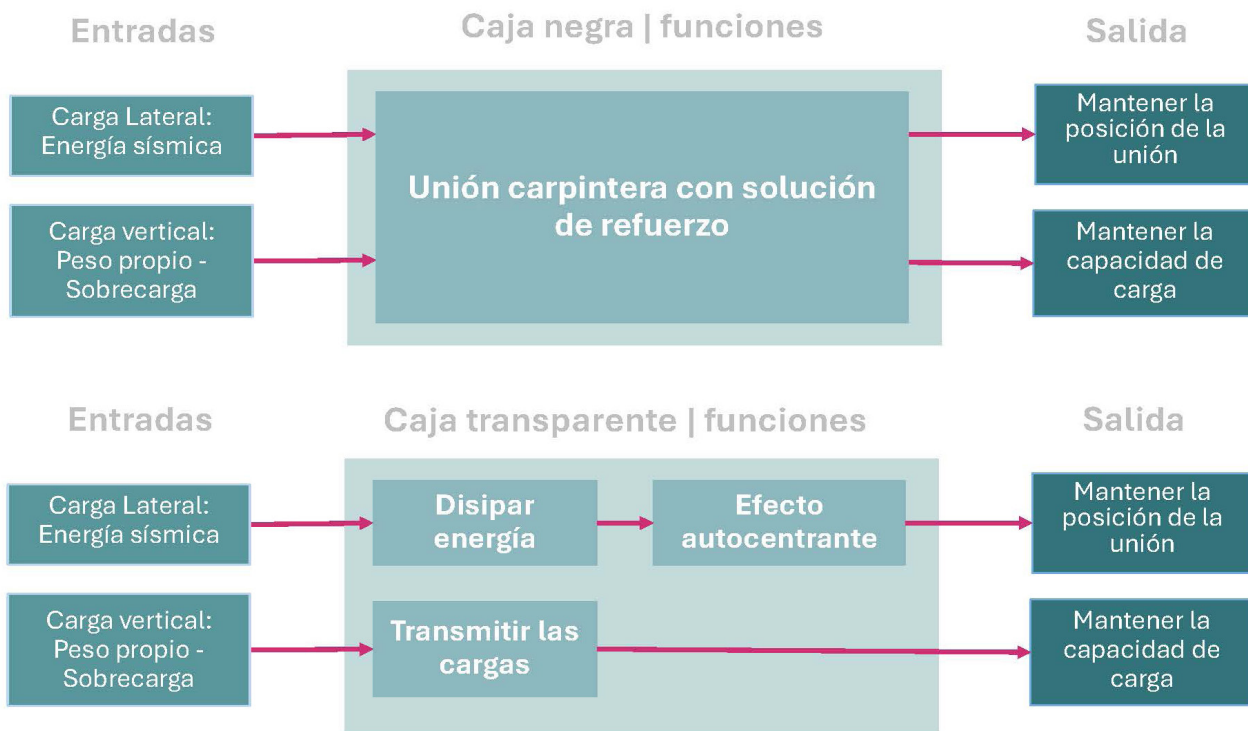


Fig. 105  
Diagrama de caja negra

Fig. 106  
Diagrama de caja transparente

carpinteras, como la función de disipación de energía, la correcta transmisión de cargas y la capacidad de mantener la posición de la unión y las piezas a largo plazo a pesar de las cargas a las que estén sometidas. Estas funciones se obtuvieron desde la Tabla 3 y la Sección 2.4 Soluciones de reforzamiento de uniones carpintera: revisiones técnicas tradicionales y de vanguardia. En este apartado, autores como Abolmaali et al. (2006); Cavalli et al. (2016); Dolce & Cardone (2001); Wu et al. (2019); Xie et al. (2019); Xue et al. (2020); Yu et al. (2022); Zhao et al. (2019) y; Zhou & Yan (2015) establecen características que buscan mejorar con las diversas soluciones de reforzamiento propuestas en las diferentes investigaciones..

#### 4.2.4 EVALUACIÓN COMPARATIVA

Una vez se establecen las funciones que deben resolver los diseños de reforzamiento, se aplica el Método de Evaluación Comparativa, también conocido como benchmarking. Esta es una herramienta de investigación cualitativa que permite determinar una variedad de soluciones para el diseño de un producto a partir de las experiencias y diseños existentes que satisfagan los mismos objetivos. Esta comparativa proporciona al usuario información sobre las cualidades que potencian el producto a partir de la comparación entre objetos, con la finalidad de analizar y determinar diferentes mecanismos que satisfagan las necesidades establecidas en la definición del problema al inicio de la metodología.

En este estudio, se implementará la evaluación comparativa para estudiar las soluciones de reforzamiento existente en la literatura para las diferentes tipologías de uniones carpinteras que se estudian en esta investigación. Esta etapa se compone principalmente del análisis y la comparación de las soluciones de reforzamiento que fueron estudiadas en el apartado 2.4. “Soluciones de reforzamiento de uniones carpintera: revisiones técnicas tradicionales

y de vanguardia” (Tabla 11), y los objetivos planteados para el diseño de solución de refuerzo planteados en la Tabla 5. Segmentación de objetivos, bajo los criterios de desempeño, seguridad, costos y apariencia.

Se consideran los criterios de desempeño, como la reversibilidad, facilidad de instalación, que sea liviano y la compatibilidad de los materiales con la madera. También se establecieron criterios de seguridad, como la protección de la unión contra la separación y la prevención de daños al elemento de madera. Además, se consideraron criterios de costos, incluyendo bajo costo de producción y mantenimiento, así como criterios de apariencia, como dimensiones moderadas en cuanto a los elementos que forman parte de la solución.

El propósito de esta evaluación es, en primera instancia, comprender que cualidades de los refuerzos responden de manera efectiva a los objetivos establecidos, identificando las características positivas y negativas de cada solución de refuerzo. Esto justificará y orientará la posterior selección de las soluciones analizadas según su eficiencia y su adaptación a los objetivos de este estudio.

En esta etapa de la metodología, se adoptó el método de evaluación comparativa propuesta por Elizondo (2015); Rosas (2017) y; Steinmeyer (2015). Este método se basa en un análisis cualitativo de los casos de estudio e implementa una escala de evaluación ponderada que utiliza puntajes de 1,3 y 5. Aunque se conserva la numeración, en este trabajo se adapta el rango, ya que los autores mencionados utilizaron una categorización de bajo, medio, alto, sin proporcionar contexto. En esta investigación se emplea la escala propuesta en la Tabla 12, donde el valor 1 corresponde a las técnicas que no cumplen con el objetivo evaluado, el 3 indica un cumplimiento moderado y el 5 representa un cumplimiento satisfactorio. Este proceso se llevó a cabo sin considerar ningún tipo de unión en específico, sino más bien se focalizó en el comportamiento de la solución de refuerzo bajo cargas impuestas en ensayos.

Tab. 11 Diagrama de caja negra y caja transparente

Cuña de madera	Placa de bambú	Estribos	Perno interno	Tirante de unión	Tornillo autorroscante
 (Branco & Descamps, 2015)	 (Wu et al., 2019)	 (Parisi & Piazza, 2000)	 (Parisi & Piazza, 2000)	 (Parisi & Piazza, 2000)	 (Poletti et al., 2015)
Abrazadera	Amortiguador metálico	Gancho de acero	Láminas de polímeros reforzadas con fibra de carbono	Láminas de polímeros reforzadas con fibra de vidrio	Hilos de aleación con memoria de forma
 (Zhou & Yan, 2015)	 (Dai et al., 2022)	 (Zhou & Yan, 2015)	 (Zhou & Yan, 2015)	 (Aslankaya, 2019)	 (Xue et al., 2020)

Escala de puntaje	
Cumplimiento satisfactorio	5
Cumplimiento moderado	3
No cumple con el objetivo	1

Tab. 12  
Escala de puntaje utilizada en la evaluación comparativa. Basada en (Elizondo, 2015; Rosas, 2017; Steinmeyer, 2015).

Finalmente, se obtuvo un puntaje ponderado que corresponde a la suma total de la evaluación de cada ítem.

La Tabla 13 muestra la evaluación comparativa de las soluciones de reforzamiento aplicada a los refuerzos, donde se aprecia que entre las tres soluciones mejores ponderadas se encuentra el amortiguador metálico con una puntuación de 4,6 puntos, seguido por el tirante de unión con una puntuación de 4,3 puntos, y finalmente los estribos con 4,1 puntos.

La solución que utiliza un amortiguador metálico (Dai et al., 2022; Xue et al., 2021a; Yu et al., 2022) es una de las soluciones más modernas y cumple con los objetivos evaluados, siendo técnicamente reversible debido a que no atraviesa la unión y protege la separación de las partes. Seguido por el método de refuerzo conocido como tirante de unión (Branco & Descamps, 2015; Parisi & Piazza, 2000), correspondiente a una tira de acero plano que amarra la estructura evitando la separación de los elementos, considerándose como una técnica reversible, fácil de instalar, adecuada a la sección y, por ende, liviana. No obstante, requiere de mantenimiento constante ya que esta tira debe estar tensa para su correcto funcionamiento. En tercer lugar, se encuentra la solución de estribos (Branco & Descamps, 2015; Palma et al., 2010; Parisi & Piazza, 2000) corresponde a una placa por ambos lados de la unión, que, si bien permite mantener la posición de la unión, esta atraviesa la unión generando que sea semi reversible a diferencia de otras soluciones. Sin

Solución de refuerzo	Criterios de Evaluación									Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Cuña de madera	5	1	5	5	3	5	5	1	5	3.9
Placa de bambú ranurada	1	1	5	5	3	1	3	1	5	2.8
Estribos	3	5	5	3	5	3	5	3	5	4.1
Perno interno	1	1	5	3	3	1	5	3	5	3.0
Tirante de unión	5	5	5	3	5	5	5	1	5	4.3
Tornillo autorroscante	1	1	5	3	1	1	5	5	5	3.0
Abrazadera	5	3	3	3	5	5	5	3	3	3.9
Amortiguador metálico	5	3	5	3	5	5	5	5	5	4.6
Gancho de acero	3	3	3	3	3	5	5	3	5	3.7
Láminas de polímeros reforzada con fibra de carbono	1	3	5	5	3	5	3	3	5	3.7
Láminas de polímeros reforzadas con fibra de vidrio	1	3	5	5	3	5	3	3	5	3.7
Hilos de aleación con memoria de forma	5	1	3	3	5	5	1	1	5	3.1

Tab. 13  
Evaluación comparativa de soluciones de reforzamiento.

1° mejor ponderado
  2° mejor ponderado
  3° mejor ponderado

embargo, es un método fácil de instalar, liviano, de bajo costo de producción y mantención.

Por otro lado, a las tres mejor ponderadas le siguen con una puntuación de 3,9 puntos la cuña de madera y las abrazaderas. La solución tipo cuña de madera (Branco & Descamps, 2015) es considerada una solución reversible debido al uso de la misma materialidad de la estructura. Por otro lado, se considera con un tamaño adecuado y compatible con la unión. Además, esta solución no ocasiona daños en las piezas (perforaciones, adhesivos, etc.), es liviana, y tiene bajo costo de producción. Sin embargo, las cargas aplicadas en las estructuras podrían llegar a provocar que esta se salga de la posición permitiendo la separación de los elementos. La solución de refuerzo tipo abrazadera (Li et al., 2021) es técnicamente reversibles, pero no siempre de fácil instalación, ya que esto dependerá de la geometría de la unión. Este tipo de soluciones si protegen de la separación de los elementos y no causan daños en la madera, sin embargo, son medianamente aparatoso debido a que cubren completa para mantener la junta en su lugar.

#### 4.2.5 LISTA DE REQUERIMIENTOS

Una vez comparadas y analizadas las diferentes técnicas de refuerzo utilizadas por diversos autores en diferentes tipos de uniones carpinteras, se elaboró una lista de requerimientos de diseño con el objetivo de establecer criterios cuantitativos y cualitativos para diseñar de manera precisa y eficiente las soluciones de refuerzo para cada tipo de unión estudiada en

Lista de requerimientos	
<b>1</b>	<b>Geometría</b>
R	Largo, ancho y alto solera < 90 mm
R	Largo y ancho pie derecho <90 mm
D	Número de piezas < 20
D	Liviano < 10 Kg
<b>2</b>	<b>Fuerzas</b>
D	Capacidad de carga lateral (sísmica) 20 KN
D	Carga lateral incremental (desplazamiento)
D	Carga vertical (peso propio y sobre carga)
<b>3</b>	<b>Materiales</b>
R	Alta resistencia
R	Semirrígido
<b>4</b>	<b>Seguridad</b>
R	Evitar adhesivos
R	Evitar zonas cortantes
D	Falla dúctil
<b>5</b>	<b>Mantenimiento</b>
D	Bajo número de mantenciones anuales
<b>6</b>	<b>Costos</b>
D	Costo de producción < \$100.000
D	Bajo costo de mantenimiento

Tab. 14  
Lista de requerimientos

esta investigación. De acuerdo con la Tabla 14, los nuevos requisitos se categorizaron en seis clases: (1) geometría, relacionada con las dimensiones del refuerzo, el número de elementos y su peso; (2) capacidad de carga, basado en los ensayos de carga lateral, vertical y los modos de fallo de cada unión carpintera; (3) comportamiento estructural, vinculada al comportamiento de la unión, considerando su capacidad resistente y carácter semi rígido; (4) seguridad, orientada a cuidar la integridad unión, evitando adhesivos, zonas cortantes y provocando la falla dúctil; y (6) costos, con énfasis en la reducción de los costos de producción y mantención. Estos parámetros cuantitativos y medibles se solicitan con el propósito de aplicarlos en el diseño de producto y lograr una efectiva satisfacción de los objetivos establecidos en la definición del problema. Los criterios se adaptaron a diferentes niveles de generalidad en la solución propuesta, ya que especificaciones demasiado generales podrían inducir a soluciones inadecuadas. Asimismo, se identificaron los atributos de

#### 4.2.6 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD

La metodología propuesta también considera el despliegue de función de calidad o Quality Function Deployment (QFD) que corresponde a una herramienta basada en un diagrama del tipo matriz que usualmente se denomina “La casa de calidad”. Esta función fue inventada en la década del 1960 por Yoji Akao y Shigeru Mizuno (Tamayo & Bosch, 2004), y se basa en tres fundamentos. El primero es la determinación de la voz del usuario, el segundo considera organizar, consolidar y traducir la información, y, finalmente, determinar las características de calidad del producto. Esta herramienta proporciona una metodología gráfica para descubrir las necesidades y expectativas declaradas y no declaradas de un cliente, con la finalidad de tomar decisiones en el caso de que las necesidades y expectativas entren en conflicto, impulsando el desarrollo y la fabricación de un producto que cumpla con los requisitos y expectativas del cliente (Berk & Berk, 2000; Kiran, 2017).

La matriz despliegue de la función de calidad es una herramienta que requiere la información obtenida en las etapas previas de la metodología para el análisis completo de las necesidades y oportunidad de las soluciones de reforzamiento para uniones carpinteras que se busca diseñar. Como se observa en la Figura 107, la matriz se subdivide en ocho partes. El ítem (1) considera los requisitos de los clientes relacionados con las necesidades de reforzamiento de las uniones. En otras palabras, son los objetivos mencionados en el apartado 5.1.3, “Definición de la problemática”, y tienen la finalidad de responder a las preguntas: ¿qué se necesita? o ¿qué se requiere? El ítem (2) (Figura 107) responde a la lista de especificaciones y parámetros cuantitativos y cualitativos necesarios para el refuerzo, respondiendo a la pregunta ¿cómo se realizará? del apartado 5.1.7, “Lista de requerimientos”. A partir de esto, el ítem 3 es la relación entre el ítem (1) y (2), generando una correlación entre ambos parámetros.

El ítem (4) considera el peso absoluto adyacente a cada atributo u objetivo obtenido a partir del proceso de comparación de pares desplegado en el apartado 5.1.4, “Comparación de pares”. Los ítems 5 y 6 hacen referencia

a los cinco reforzamientos mejor ponderados en la etapa de evaluación comparativa, diferenciándose para cada tipo de unión en el apartado 5.1.6, "Evaluación comparativa", siendo el número (5) el nombre de las soluciones de refuerzo y el número (6) los puntajes obtenidos. El ítem 7 denominado valor objetivo o límite, relaciona los parámetros establecidos en la lista de requerimientos en el apartado 5.1.7, "Lista de requerimientos", con una escala de dificultad para lograr cada requerimiento, siendo 0 fácil de lograr y 10 muy difícil de lograr.

Finalmente, el número 8 es la sección correspondiente a la metodología TRIZ, explicada en el apartado 5.1.9, "Resolución de contradicciones con la metodología TRIZ", donde se estima la cantidad de interacción o acoplamiento entre requerimientos. Este ítem indicará las características que no son acopladas y las cuales se pueden acoplar una a una sin afectar a otras características técnicas en el siguiente paso de la metodología.

Las Figura 108 muestra el despliegue de la función de calidad para la solución de refuerzo que se busca diseñar. Esta matriz evidencia la relación entre los pasos previos a esta, permitiendo un análisis macro de las necesidades para crear un refuerzo y los productos disponibles en el mercado, a través de los vínculos que se establecen en la matriz. Además, se ofrece la posibilidad de realizar un análisis micro de cada parte del diagrama, lo que permite examinar en profundidad cada una de las etapas previas. La aplicación de la matriz en el estudio muestra la relación entre los objetivos propuestos en una etapa inicial y la lista de requerimientos, evidenciando

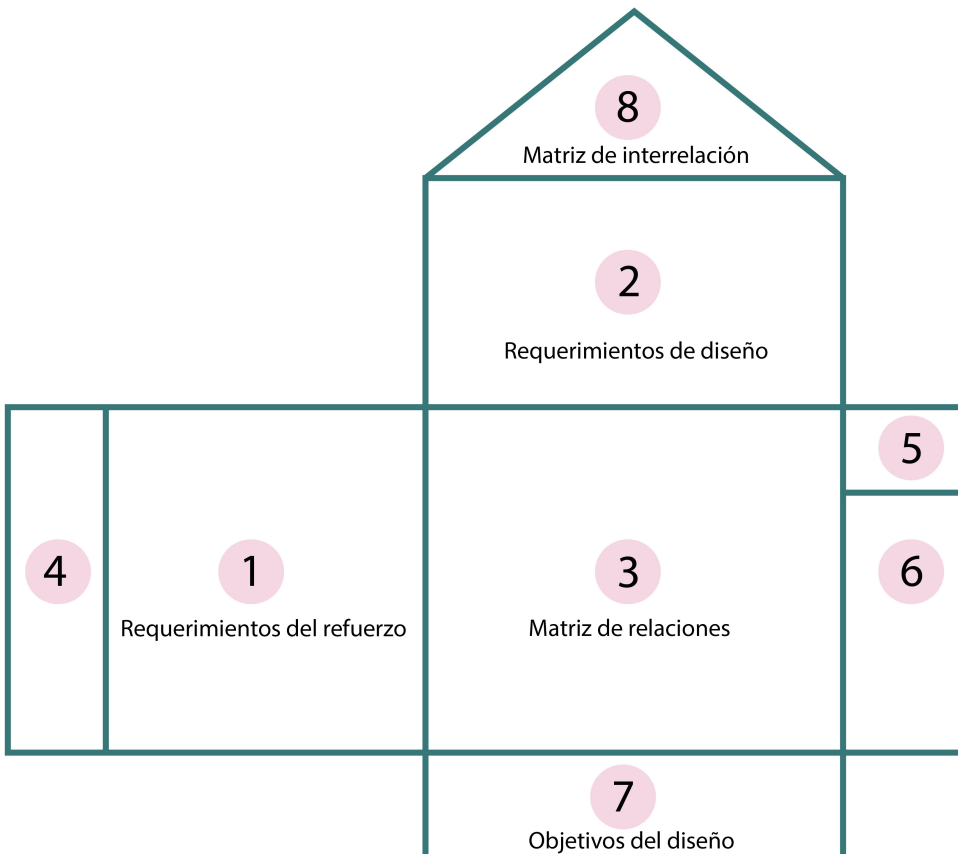


Fig. 107 Diagrama matriz casa de calidad

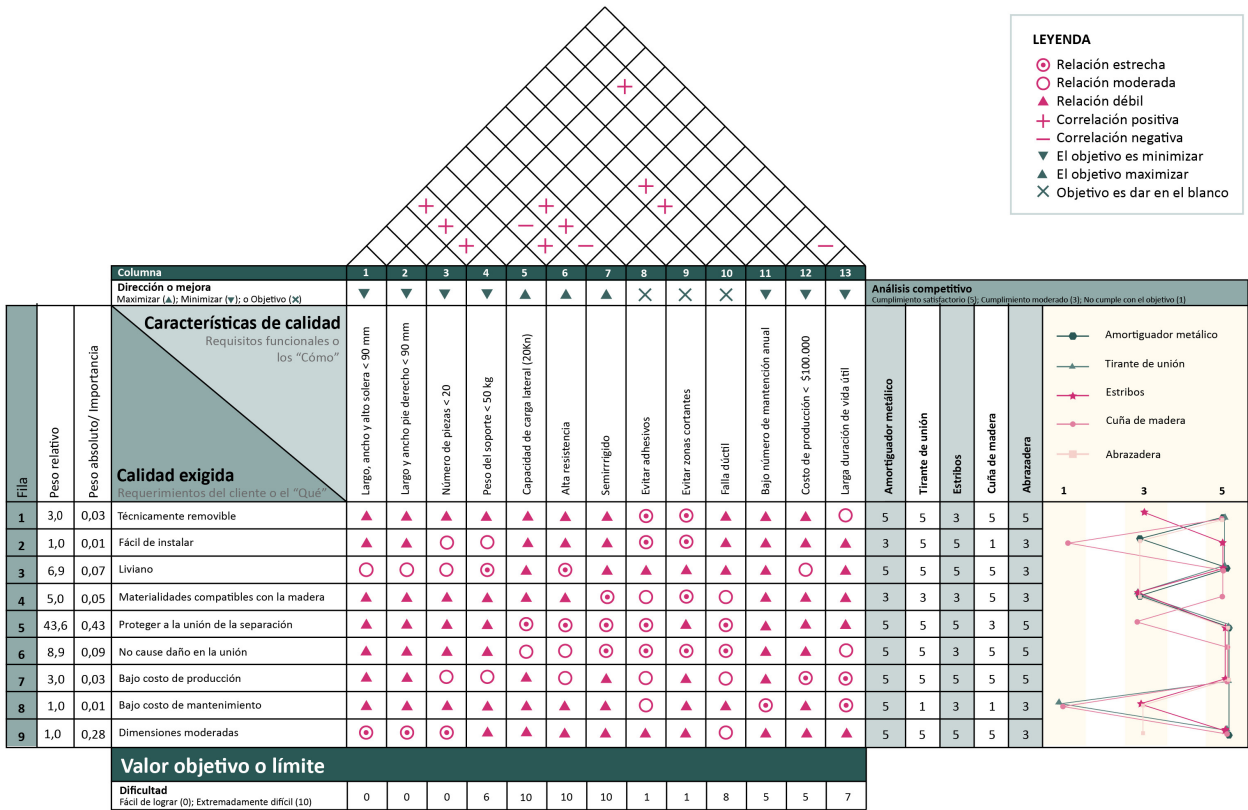


Fig. 108 Evaluación comparativa de soluciones de reforzamiento.

las condiciones y objetivo que deben cumplirse para lograr una solución de refuerzo que cumpla con las expectativas.

Junto a lo anterior, como se mencionó anteriormente, el ítem 7 de la Figura 107 corresponde al análisis previo necesario para aplicar la metodología TRIZ, explicada en el apartado 5.1.9, "Resolución de contradicciones con la metodología TRIZ", donde se observa la relación entre parámetros los establecidos en la etapa de lista de requerimientos del apartado 5.1.7, "Lista de requerimientos", lo que permite un análisis detallado de las necesidades que la solución de refuerzo debe satisfacer. Se observa que, en las relaciones positivas y negativas, se generan tres contradicciones en el sistema, las cuales se resolverán en el siguiente paso.

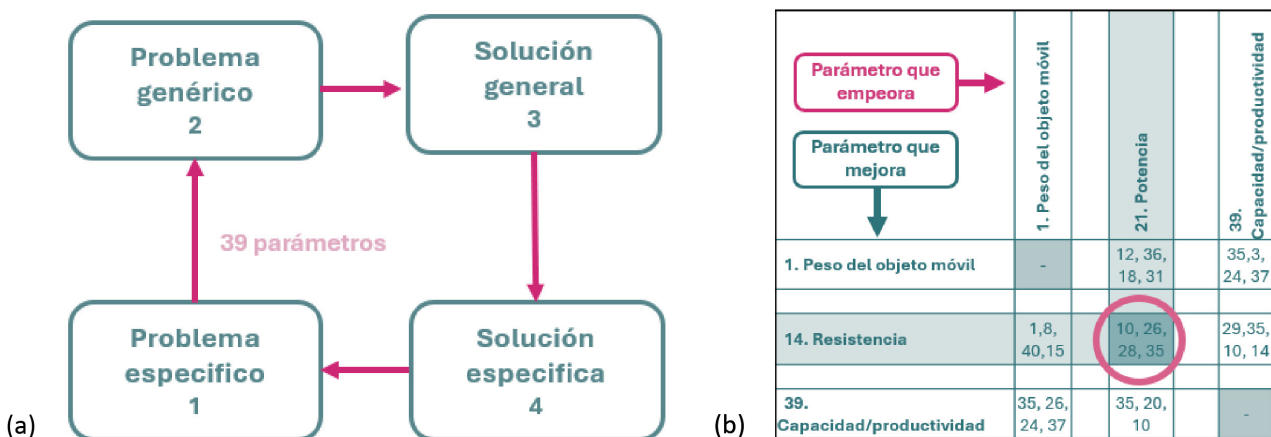
**4.2.7 RESOLUCIÓN DE CONTRADICCIONES CON TRIZ**

La teoría de la solución de problemas de inventiva, conocida por sus siglas como TRIZ, fue desarrollada por Genrich Alrshuller a comienzos del año 1946, y se basa en el estudio de modelos evolutivos sobre patentes y el análisis de la resolución de diferentes problemas (Altshuller, 2002). Isoba (2007) explica que este conjunto de diversos procesos de razonamiento tiene como objetivo llevar a cabo la resolución de problemas con soluciones innovadoras a través de la creatividad. De esta manera, la metodología TRIZ plantea una contradicción o problema como un sistema, en el que, a partir de una función principal “A” existirá otra función “B” que se verá perjudicada con la mejora de “A”. A través de este método se buscan disminuirán o erradicarán estas problemáticas mediante una matriz armada desde conceptos universales (ver Figura 109), los cuales llevarán directo a posibles soluciones para dichas contradicciones (Ames, 2008).

La metodología TRIZ se compone de cuatro pasos que tienen como objetivo entregar una resolución específica a un problema de diseño, desde una solución general a una particular, a través de los principios de inventiva (ver Figura 109a). El primer paso de la matriz consiste en transformar un problema específico a uno genérico mediante el uso de dos conceptos universales pero opuestos, propuestos por el método TRIZ a través de una lista de conceptos, los cuales deben ser representativos de la contradicción a resolver. Estos conceptos se encuentran presentes en la matriz predeterminada de la metodología, donde la convergencia de ambos parámetros se representa a través de números del 1 al 40, que representan los diferentes principios de inventiva que permitirán una mejora o erradicación de la contradicción (ver Figura 109b). Si bien la matriz refleja diversas soluciones tipo desde los principios de inventiva, es necesario llevar a cabo un análisis posterior de las definiciones correspondientes para encontrar la solución adecuada a la problemática, en este caso, los refuerzos para las uniones carpinteras.

El despliegue de la función de calidad en la Figura 108 del apartado 5.1.8, “Despliegue de la función de calidad” muestra tres contradicciones en el sistema de diseño para la solución de refuerzo. El primer paso de esta metodología consiste en traducir las características de calidad de la Figura 108, que están en discusión, a conceptos universales estipulados en una lista proporcionada por Altshuller (2002). Como se muestra en la Tabla 15,

Fig. 109 Resolución de contradicciones con TRIZ: (a) Matriz de contradicciones; (b) funcionamiento de la matriz. Fuente: (Henrich & Rojas, 2013)



cada una de estas características fue reemplazada por un concepto universal similar al estipulado en una etapa inicial con el objetivo de encontrarlo en la matriz y poder identificar las soluciones propuestas. Cada uno de estos problemas de la Tabla 15 presentó más de una solución general, sin embargo, se seleccionaron las dos más acordes a la problemática específica del refuerzo mediante el análisis de la solución particular.

La primera contradicción detectada en la matriz del despliegue de la función de calidad (ver Tabla 15) se reconoce como la necesidad de una solución de alta resistencia frente al peso de la solución de refuerzo, que se traduce, según la metodología TRIZ, en los conceptos resistencia frente al peso del objeto estacionario, lo que arroja dos soluciones. En primer lugar, la segmentación o división del objeto en partes independientes y, en segundo lugar, la utilización de materiales compuestos.

La segunda contradicción deriva del requisito alta capacidad resistente frente a utilizar un material semirrígido, lo cual se conceptualiza según TRIZ en resistencia versus adaptabilidad. La primera solución para esta contradicción consiste en el uso de una película flexible y, en segundo lugar, considerar la transformación de los estados físicos y químicos de un objeto, lo que deriva en cambiar un estado de agregación de un objeto, concentración de densidad o grado de flexibilidad.

Finalmente, se genera una contradicción entre los requerimientos de bajo costo de producción y larga duración de vida, que se traduce en considerar la manufacturabilidad frente a la durabilidad de un objeto sin movimiento.

Tab. 15  
Resolución de contradicciones con la metodología TRIZ.

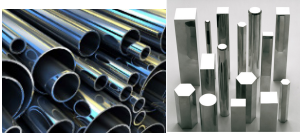

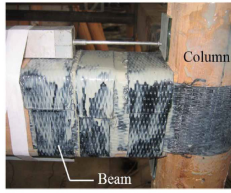
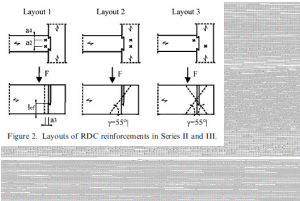
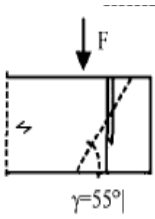

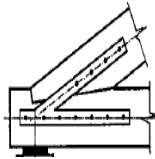
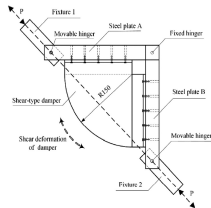
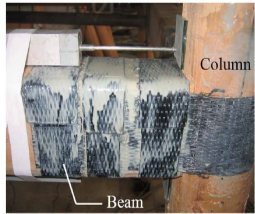
Problema particular	Problema general	Solución general	Solución particular
Alta resistencia vs Peso de la solución de refuerzo	<b>14. Resistencia</b> vs <b>2. Peso del objeto estacionario</b>	1. Segmentación	Dividir el objeto en partes independiente
		40.- Materiales compuestos	Reemplazo de materiales homogéneos por materiales compuestos
Alta capacidad resistente vs Semirrígido	<b>14. Resistencia</b> vs <b>35. adaptabilidad</b>	30.- Película flexible o membranas delgadas	Reemplace las construcciones habituales con membranas flexibles y películas delgadas
		35. Transformación de los estados físicos y químicos de un objeto	Cambiar un estado de agregación de un objeto, concentración de densidad, grado de flexibilidad, temperatura
Costo de producción bajo vs Larga duración de vida	<b>32. Manufacturabilidad</b> vs <b>16. Durabilidad de un objeto sin movimiento</b>	16. Acción parcial o sobrepasada	Ejecute algo de más o de menos para simplificar el problema
		35. Transformación de los estados físicos y químicos de un objeto	Cambiar un estado de agregación de un objeto, concentración de densidad, grado de flexibilidad, temperatura

La primera solución para esta contradicción consiste en una acción parcial o sobrepasada, que significa ejecutar algo de más o de menos para simplificar el problema, y, en segundo lugar, vuelve a arrojar la solución de transformación de los estados físicos y químicos de un objeto

#### 4.2.8 CARTA MORFOLÓGICA

Finalmente, la Tabla 16 aborda el desarrollo de una carta morfológica, que representa un proceso de análisis de los pasos previos, principalmente de la evaluación comparativa referente al estudio de diversas soluciones de refuerzo, y de la metodología de resolución de problemas TRIZ. A partir de las diferentes tipologías de refuerzos analizadas se conceptualizan los parámetros recurrentes en estas soluciones, tales como el tipo de anclaje, posición y materialidad del refuerzo. En cuanto al tipo de anclaje se identifican tres soluciones para las uniones carpinteras.

En primer lugar, los anclajes que envuelven la unión sin atravesar la madera, como es el caso de las abrazaderas o de los refuerzos fabricados con láminas de acero. También se incluyen las soluciones que emplean anclajes que atraviesan la madera, tales como los estribos y tornillos autorroscante, y aquellas soluciones que hacen uso de ambos métodos. Por otro lado, se consideró el tipo de soporte, haciendo referencia a la posición del refuerzo en la unión, pudiendo estar en las caras frontales, laterales o ser de tipo mixto. Por último, la materialidad deriva de los pasos mencionados anteriormente, con el acero como el material utilizado comúnmente en soluciones de refuerzo. En cuanto a los demás materiales, estos responden a la solución de la metodología TRIZ “uso de película flexible”, “materiales compuestos” y “cambiar un estado de agregación de un objeto, concentración de densidad o grado de flexibilidad”. Por lo tanto, se sugieren materiales compuestos como los polímeros reforzados con fibra de carbono o fibra de vidrio, el aluminio como un material de baja densidad, ligero blando y maleable a diferencia del acero, finalmente los plásticos o materiales viscoelásticos.

Función	Concepto		
<b>Tipo de material</b>	Aleación de aluminio / acero 	Plásticos / materiales viscoelásticos 	Materiales compuestos (Polímeros con fibra de carbono o fibra de vidrio) 
	<a href="http://eural.com/metalcast.com">eural.com/metalcast.com</a>	<a href="http://ironside.cl">ironside.cl</a>	(Zhou & Yan, 2015)
<b>Tipo anclaje</b>	Envoltorio / exterior 	Anclaje a través de la madera 	Mixto 
	(Zhou & Yan, 2015)	(Tannert, 2016)	(Zhou & Yan, 2015)
<b>Posición del soporte</b>	Frontal 	Lateral 	mixto 
	(Palma et al., 2010)	(Dai et al., 2022)	(Zhou & Yan, 2015)

Tab. 16  
Carta morfológica.

### 4.3 GENERACIÓN DE CONCEPTOS PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE LAS SOLUCIONES DE REFORZAMIENTO DE LAS UNIONES CARPINTERAS

El último paso de la metodología consiste en la creación de tres conceptos de refuerzo, los cuales se aplicarán a las tres uniones carpinteras en investigación con el objetivo de verificar la aplicabilidad de la solución a diferentes tipos de juntas. Aunque todos los pasos anteriores se centran en el análisis de las necesidades que la solución de refuerzo debe satisfacer, fueron las etapas de la aplicación de la metodología TRIZ y de la carta morfológica las que proporcionan las primeras pautas para ejecutar los diseños. En esta etapa, se tuvieron en cuenta los resultados de la metodología TRIZ, que incluyen la división del objeto en partes independientes y el uso de materiales flexibles. Estas directrices se reflejan en las materialidades propuestas en el apartado 5.1.10, así como en las dos categorías de la carta morfológica que consideran el tipo de anclaje y la posición del soporte. A partir del análisis de esta carta, se generaron tres ideas o “conceptos” con el objetivo principal de evitar la separación de las piezas y utilizar dos materialidades diferentes. Las propuestas serán presentadas a continuación.

#### 4.3.1 RESULTADOS

El primer diseño conceptual, denominado “Placa frontal compuesta”, consta de dos placas planas de material resistente como el metal (material 1), dispuestas en cada elemento de madera que compone la unión carpintera. En el medio de estas dos placas de material resistente, se propone disponer una placa intermedia plana de un material flexible (material 2), con el objetivo de unir ambas placas metálicas (ver Figura 110). Este concepto se posiciona en la parte frontal y trasera de la unión, generando una conexión a través de la madera con el fin de anclarse a los elementos del entramado de madera, sin atravesar directamente la junta. Este primer concepto se aplica a los tres tipos de uniones carpinteras en estudio, es decir, al ensamble caja y espiga (ver Figura 111a); embarbillado frontal (ver Figura 111b) y; cola de milano (ver Figura 111c). Para los tres casos, el concepto de “Placa frontal compuesta” se adapta según la geometría y posición de la unión carpintera, lo que provoca que el refuerzo para el caso del ensamble embarbillado frontal (Figura 111b) presente diferencias en cuanto a la posición de las placas y la forma de la placa flexible.

El segundo concepto, denominado “Abrazadera compuesta” (ver Figura 112), implica el uso dos abrazaderas formadas por una placa plana de un material resistente como el metal (material 1), que rodea el perímetro de cada elemento de madera que compone la unión carpintera, generando un anclaje exterior que no perfora la madera. Ambos elementos de la abrazadera se unen a través de una placa plana de material flexible (material 2). No obstante, dependiendo de la posición de la unión carpintera, este concepto podría variar, sustituyendo una abrazadera por una placa conectada a través de la madera. El segundo concepto aplicado a los tres tipos de uniones carpinteras en estudio, es decir, al ensamble caja y espiga (ver Figura 113a); embarbillado frontal (ver Figura 113b) y; cola de milano (ver Figura 111c). Solo en el caso de la unión caja y espiga (Figura 113a) se presenta el cambio

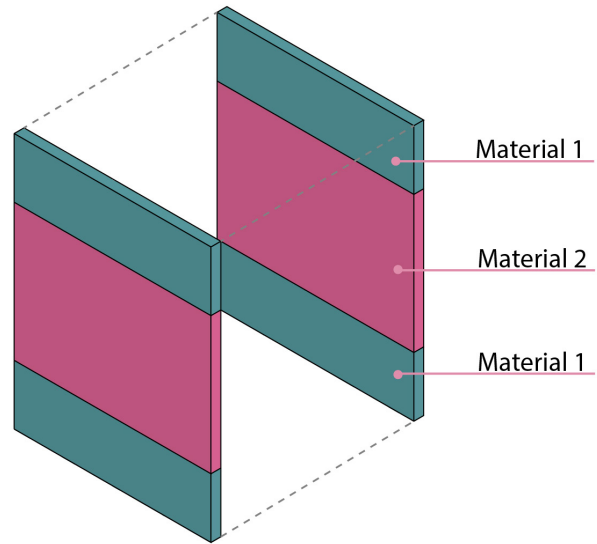


Fig. 110  
Concepto 1: placa frontal compuesta.

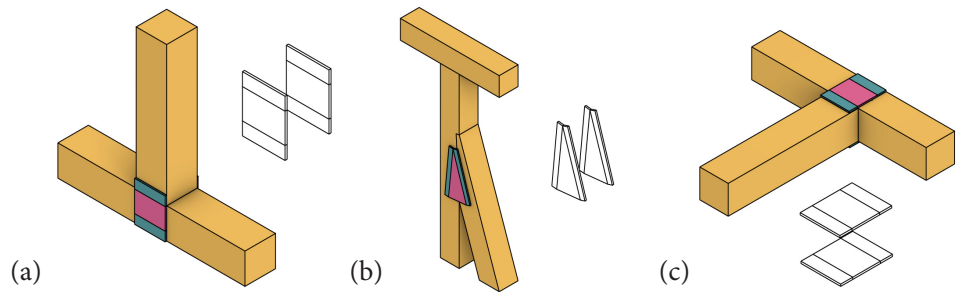


Fig. 111  
Aplicación de concepto "Placa frontal compuesta" a diferentes uniones carpinteras; (a) caja y espiga; (b) embarbillado frontal; (c) cola de milano.

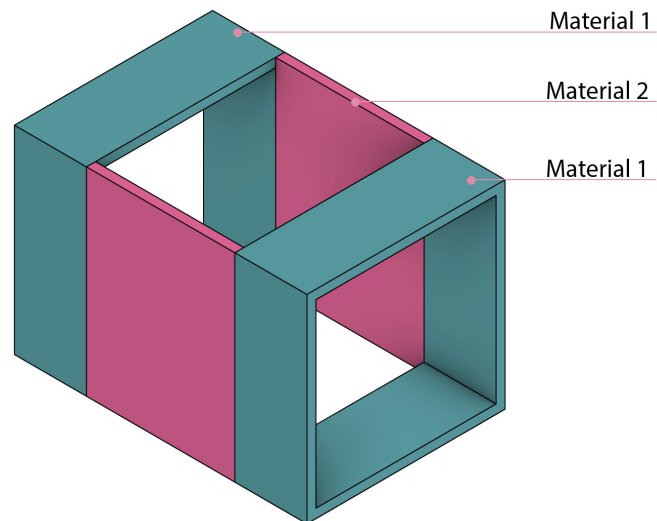


Fig. 112  
Concepto 2: Abrazadera compuesta.

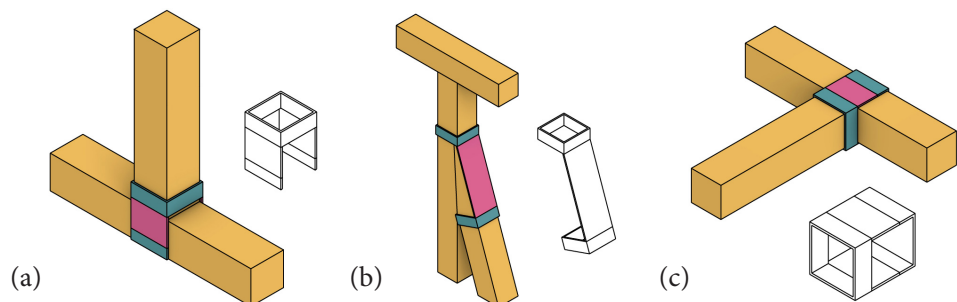


Fig. 113  
Aplicación de concepto abrazadera compuesta a diferentes uniones carpinteras; (a) caja y espiga; (b) embarbillado frontal; (c) cola de milano.

de una abrazadera por una placa conectada a través de la madera, debido a la posición en la que se encuentra la unión, por ejemplo, en un muro de entramado de madera.

El tercer concepto, similar al primero, se denomina “Placas laterales compuesta” (ver Figura 114). Este dispositivo está compuesto por dos placas planas de un material resistente como el metal (material 1), que se ajustan al contorno lateral de ambos elementos de madera que componen la unión carpintera. Estas placas se conectan a la madera mediante la inserción de otro elemento metálicos, como los tirafondos a la madera. Además, se añade un material flexible (material 2) en la parte superior de las placas planas para unir ambos elementos adheridos a la madera. El tercer concepto se aplica a los tres tipos de uniones carpinteras en estudio, es decir, al ensamble caja y espiga (ver Figura 115a); embarbillado frontal (ver Figura 115b) y; cola de milano (ver Figura 115c). En este caso, el concepto para la unión caja y espiga, y cola de milano, solo presenta una variación en la orientación del concepto. Sin embargo, en el caso de la unión embarbillado frontal, el concepto es similar al predeterminado con la diferencia en la apertura del ángulo que se forma en la unión de ambos elementos de madera.

Una vez definido los tres conceptos, se desarrolla una evaluación y clasificación para la seleccionar el concepto final, y así evaluar su

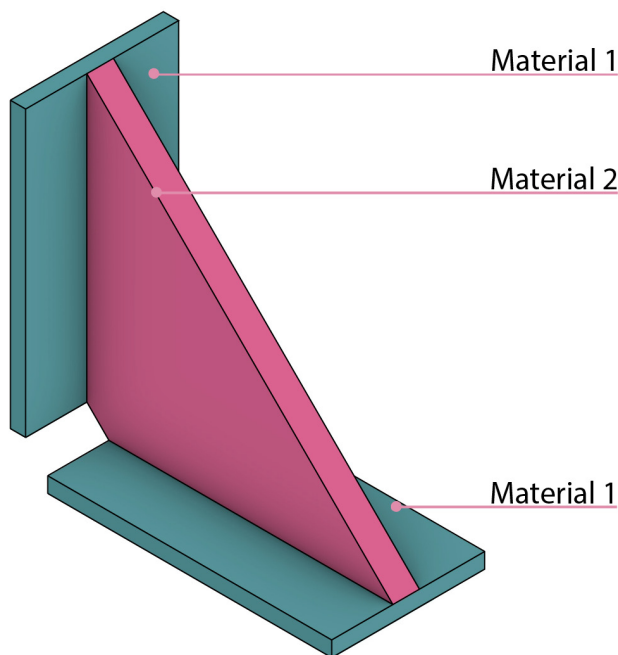


Fig. 114  
Concepto 2: Placas laterales compuestas.

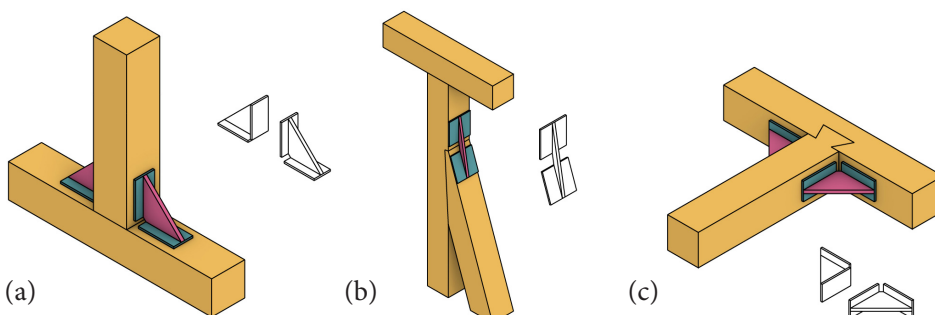


Fig. 115  
Aplicación de concepto placas laterales compuesta a diferentes uniones carpinteras; (a) caja y espiga; (b) embarbillado frontal; (c) cola de milano.

compatibilidad con los objetivos y requerimientos (apartado 5.1.3, “Definición de la problemática”) planteados en los primeros pasos de la metodología “la morfología del diseño”. El método consiste en una tabla en la que se utiliza la escala de evaluación cualitativa ponderada por Elizondo (2015), Rosas (2017) y Steinmeyer (2015), con un puntaje de 1,3 y 5, como se describe en el apartado 5.1.6, “Evaluación comparativa”. En esta escala, el valor 1 corresponde a las técnicas que no cumplen con el objetivo establecido, 3 indica un cumplimiento moderado y 5 representa un cumplimiento satisfactorio.

A partir de estos valores y teniendo en cuenta el peso ponderado para cada objetivo, se realiza una multiplicación entre el peso absoluto del objetivo y el puntaje obtenido en cada concepto para obtener un peso relativo para cada concepto (1). Luego, mediante una sumatoria de estos pesos, se obtiene un valor que genera la calificación de cada una de las ideas y ayuda a tomar una decisión informada sobre cual concepto es más adecuado en función de los objetivos y requerimientos previamente establecidos. La evaluación de los conceptos clasifica las ideas propuestas en función de su compatibilidad con los objetivos establecidos. De acuerdo con los resultados de la evaluación (ver Tabla 17), se observa que el primer concepto, denominado “placa frontal compuesta”, es el mejor evaluado, seguido por el tercer concepto, llamado “placas laterales compuesta”, y finalmente el segundo concepto, conocido como “abrazadera compuesta”. Los sistemas de anclaje a través de la madera, como es el caso del concepto 1 y 3, obtienen un puntaje de cumplimiento moderado debido a la necesidad de perforar la madera.

$$\text{Peso} = \text{Peso absoluto} * \text{Puntaje} \quad (1)$$

El concepto 2 recibe un puntaje de no cumplimiento en el segundo objetivo debido a la dificultad que posee en la instalación de los elementos correspondiente a la forma de la unión carpintera. El acero, debido a su proceso de corrosión, es un material que cumple moderadamente con el objetivo de materiales compatibles. Los conceptos que poseen un anclaje a través de la madera podrían llegar a generar daños en la madera ante carga externas. Si bien todos los conceptos responden de la mejor manera a un adecuado al tamaño de la sección, el concepto 2, denominado “abrazadera compuesta”, no cumple con el objetivo de poseer dimensiones moderadas, ya que este material envuelve la unión cubriéndola por completo.

Requerimientos		Concepto 1 "Placa frontal compuesta"		Concepto 2 "Abrazadera compuesta"		Concepto 3 "placas laterales compuesta"	
Objetivos del diseño	Peso absoluto	Puntaje	Peso	Puntaje	Peso	Puntaje	Peso
Técnicamente reversible	0,03	3	0,09	5	0,15	3	0,09
Fácil de instalar	0,01	5	0,05	1	0,01	5	0,05
Liviano	0,07	5	0,35	5	0,35	5	0,35
Materiales compatibles	0,05	3	0,15	3	0,15	3	0,15
Proteger la unión de la separación	0,44	5	2,2	5	2,2	5	2,2
No cause daño en el elemento de madera	0,09	3	0,27	5	0,45	3	0,27
Bajo costo de producción	0,03	5	0,15	5	0,15	5	0,15
Bajo costo de mantenimiento	0,01	5	0,05	5	0,05	5	0,05
Dimensiones moderadas	0,28	5	1,4	1	0,28	3	0,84
<b>Puntaje total</b>		44	5,52	38	3,79	42	4,15
<b>Ranking</b>		1		3		2	

Tab. 17  
Evaluación comparativa aplicada a los tres conceptos de refuerzo.





## CAPÍTULO 5: PROTOTIPADO DE REFORZAMIENTO PARA LA UNIÓN CARPINTERA CAJA Y ESPIGA

El presente capítulo aborda el prototipado del concepto de diseño seleccionado como mejor puntuado a través de la metodología expresada en el Capítulo 5: Propuesta metodológica para el diseño de soluciones de reforzamiento para uniones carpinteras. El capítulo se divide en dos etapas (Figura 116). El apartado 5.1. Caracterización de la propuesta de reforzamiento: variables, materialidad, geometría y especificaciones técnicas, aborda un breve análisis recopilatorio de las especificaciones técnicas de diferentes refuerzos estudiados en la etapa de evaluación comparativa en el apartado 4.1.6. El apartado 5.1.1. Iteración diseño de refuerzo para la unión caja y espiga, implica la iteración del diseño del refuerzo de la unión caja y espiga, en términos de geometría y materialidad. La sección 5.1.2. Estudio analítico para el diseño estructural del refuerzo, considera un estudio analítico del funcionamiento de la propuesta de refuerzo en la unión, considerando las cargas, esfuerzos y tensiones de esta. Finalmente, la sección 5.1.3. Especificaciones técnicas, se realiza un levantamiento técnico de la solución

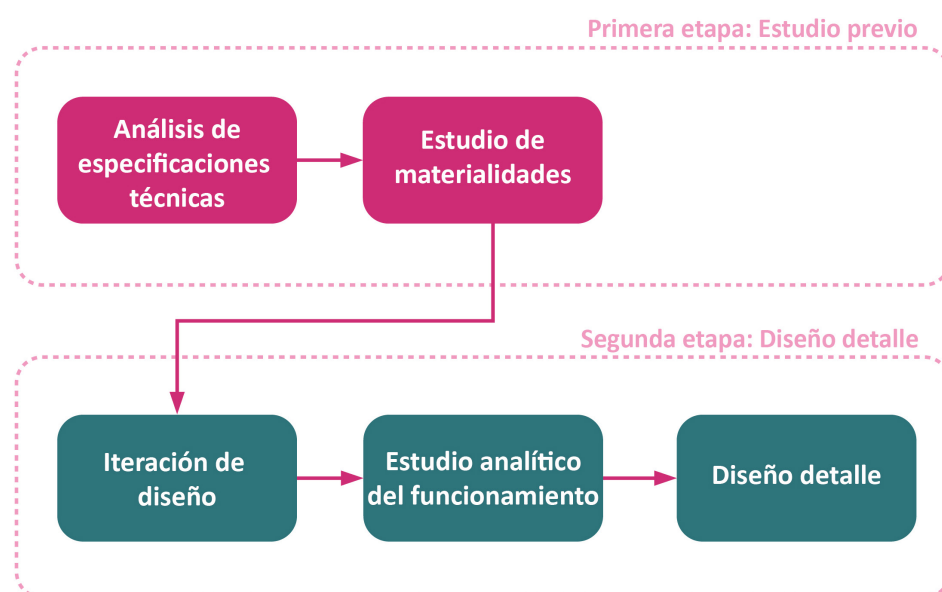


Fig. 116  
Diagrama metodología para definir el prototipado de reforzamiento para la unión carpintera caja y espiga

## 5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA PROPUESTA DE REFORZAMIENTO: VARIABLES, MATERIALIDADES, GEOMETRÍA Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

A partir de la selección del concepto número uno denominado “placa plana compuesta” (Sección 4.3.2.), se reevaluaron los antecedentes de diferentes soluciones de refuerzos planteados por otros autores en el Capítulo 4, a través de un breve análisis de sus especificaciones técnicas, con el objetivo de obtener un primer acercamiento a las materialidades utilizadas en dichas soluciones. En la Tabla 18, se observa que, dentro de las soluciones que utilizan elementos de acero, se repite el uso de placas de acero Q235 con espesores de 3, 4 y 5 mm (Branco & Descamps, 2015a; Dai et al., 2022; S. Li et al., 2023; Parisi & Piazza, 2000; Yu et al., 2022; Zhou & Yan, 2015), así como el empleo de pernos o tornillos autorroscante (Branco & Descamps, 2015a; Dai et al., 2022; S. Li et al., 2023; Parisi & Piazza, 2000; Yu et al., 2022; Zhou & Yan, 2015). Además, se destaca el uso de materiales compuestos, como, por ejemplo, placas de aceros con caucho viscoelástico (Dai et al., 2022). Esta aproximación realizada por Dai et al. (2022) propone una solución conocida como “amortiguador de cizalladura en forma de abanico”, donde implementa un proceso de vulcanización a alta temperatura para conectar ambas materialidades.

La idea preliminar de diseño considera que la solución de refuerzo se componga por elementos de dos materialidades con diferentes propiedades elásticas. Con este objetivo, se incluyen en esta investigación materiales que puedan servir como segundo componente en la solución a proponer. Con este fin, se evalúa la solución propuesta por Dai et al. (2022), que utiliza caucho viscoelástico o elastómero en conjunto con placas metálicas para generar la solución de refuerzo. Esta solución de caucho cuenta con una resistencia a la tracción de 17,3 MPa, alargamiento a la rotura del 54,9%, deformación permanente a la tracción en rotura de un 23,16%, relación de amortiguación equivalente a 8,04% y módulo de corte de 0,63 MPa. A partir de este referente, se examinan las características de los plásticos ABS con fibra de vidrio, una mezcla de acrilonitrilo butadieno estireno con un porcentaje de fibra de vidrio. Este material se distingue por ser compuestos elastómeros, altamente resistente a impactos, con un módulo de flexión de 5.63 GPa y una resistencia a la tracción de 78 MPa (Plásticos Brello, 2018).

En esta primera parte, el estudio concluye que el acero es un material versátil que permite la diversidad de soluciones de refuerzo existentes, generando diseños como placas, abrazadera, amortiguadores, entre otros. Es debido a esto que se opta por utilizar placas de acero en el diseño de la solución para la unión caja y espiga como primer material, con un espesor 5 mm y un ancho de 50 mm como estipulan los autores Branco & Descamps (2015); Li et al. (2023); Parisi & Piazza (2000); Zhou & Yan (2015). Por otro lado, aunque inicialmente se define el segundo material como viscoelástico o elastómero debido a sus características elásticas y viscosas, con capacidad de recuperar su forma original, después de ser estudiados se opta por continuar la investigación de este segundo material debido a que sus propiedades específicas dependen del número de enlaces cruzados poliméricos, de su fuerza y distribución en el material.



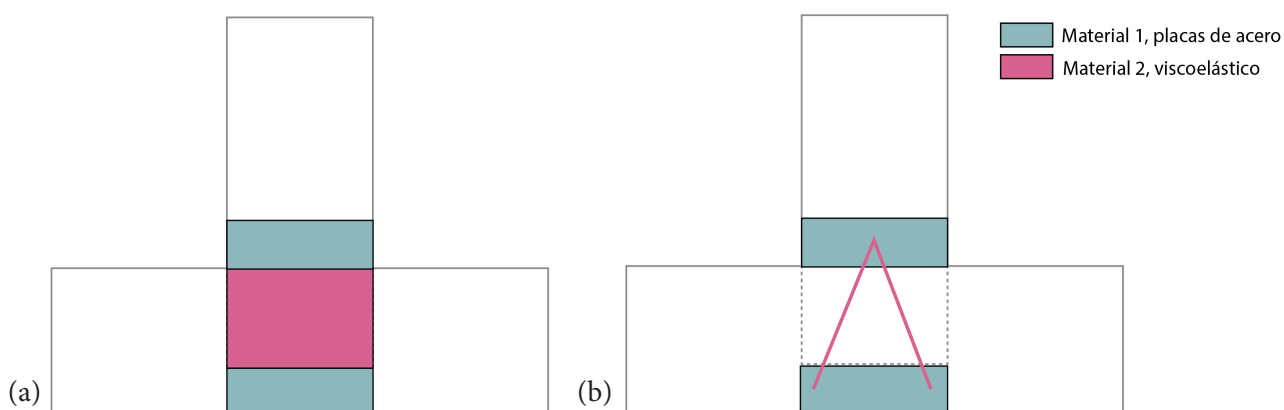
### 5.1.1 ITERACIÓN DISEÑO DE REFUERZO PARA LA UNIÓN CAJA Y ESPIGA

Posterior al estudio de casos, y con base en la revisión de sus especificaciones técnicas, se aborda la etapa de diseño preliminar de la solución de refuerzo para la unión caja y espiga. Esta fase implica un proceso iterativo hacia la búsqueda de la solución más eficiente en términos de su función estructural, optimización material y factibilidad de instalación. Además, se considera como requisito la opción de utilizar dos materialidades diferentes, que, en conjunto, puedan configurar un solo dispositivo de refuerzo. En este sentido, se declara el uso de placas de acero, en sus diferentes formatos, considerando que son elementos versátiles y ampliamente utilizados en este ámbito. Por otro lado, se iniciará un estudio exploratorio para la elección del segundo material.

A partir de estas consideraciones, se proponen dos ideas de diseños preliminares de refuerzo para la unión caja y espiga, cada uno fundamentado en la morfología del concepto “placas compuestas”, pero con diferencias en la aplicación del segundo material (aún por definir). La primera idea denominada “placa de acero viscoelástica” incorpora dos placas perforadas de acero, situadas en el pie derecho y en la solera, respectivamente, que puedan ser conectadas a la madera a través clavos o similares. Esta solución, además, considera la incorporación de un segundo material viscoelástico en forma de placa que conecte ambos elementos metálicos (ver Figura 117a). La segunda idea de diseño denominada “placa de acero con cable”, también considera el uso de placas de acero perforadas, tal como se describe en el concepto anterior, pero difiere de ella en el uso del segundo material. En este caso, se considera incorporar un elemento tipo cable para unir las placas de acero entre sí (ver Figura 117b).

Una vez definida la morfología base de ambas ideas de diseño, se procede a ajustar los criterios de diseño a través de un estudio paramétrico que tiene como objetivo encontrar la mejor solución para las ideas preliminares. En esta etapa se consideran diferentes parámetros de estudio para cada una de las soluciones. El parámetro (1) posición de las placas y (2) tamaño de las placas, son utilizados para ambas soluciones, es decir, la “placa de acero viscoelástica” y la “placa de acero con cables”. Por otro lado, el parámetro (3) orientación del cable solo será utilizado para la “placa de acero con cables”, ya que el modo de anclaje para el caso de la “placa de acero viscoelástica” dependerá del parámetro (2). Finalmente, el parámetro (4) modo de anclaje

Fig. 117  
(a) Idea 1: placas de acero con material viscoelástico. (b) Idea 2: placas de acero con cables.



de los cables corresponde a la solución de la conexión entre las placas de acero y los cables.

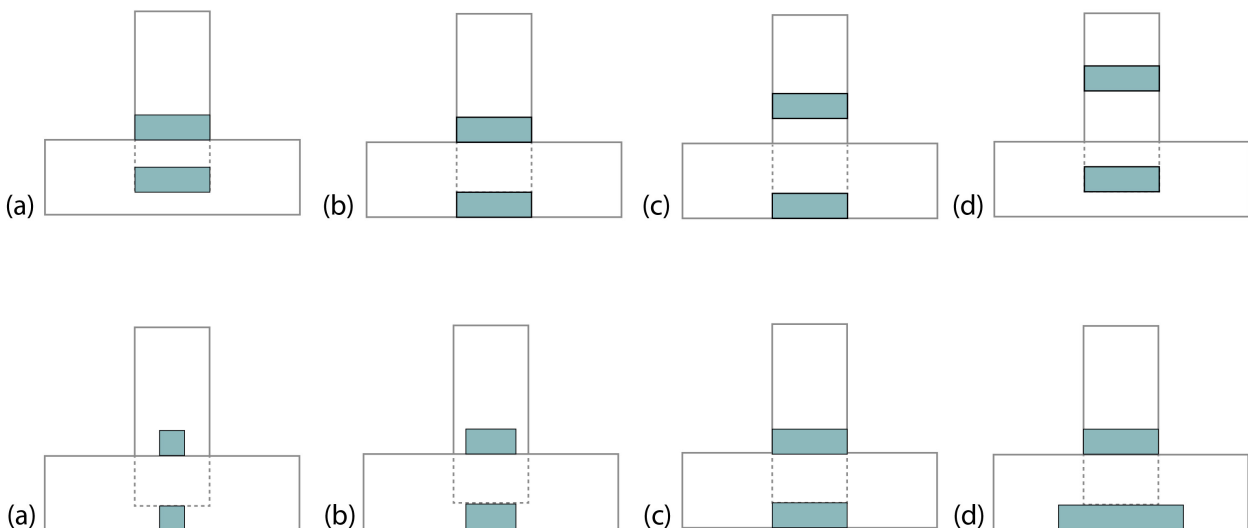
El Parámetro (1) posición de la placa (ver Figura 118) explora en la disposición de las placas de acero del refuerzo en el eje vertical de la unión. La disposición de la placa puede incidir en la fijación (o no) de la espiga inserta dentro de la caja, es decir, en resolver si esta queda fija o no en la solución. El factor de variación corresponde a una proporción de  $a/3$ , donde “a” corresponde al ancho del pie derecho. La Figura 118a muestra la opción “placa base de la espiga”, que se encuentra separado a  $1/3$  del ancho del pie derecho, con ambas placas situadas en el borde inferior tanto de la espiga como del pie derecho. La opción Figura 118b “placa base inferior”, se encuentra separado a  $2/3$  del ancho del pie derecho, y en este caso ambas placas se ubican en el borde inferior del pie derecho y de la solera. Los casos diagramados en las Figura 118c y d se separan a  $3/3$  del ancho del pie derecho. El caso particular diagramado en la Figura 118c “placa base inferior solera” se posiciona en la base de la solera, mientras que el caso Figura 118d “placa base de la espiga” se posiciona en la base de la espiga.

El Parámetro (2) evalúa las dimensiones de las placas de acero en relación con su longitud (ver Figura 119). El ancho de la placa no varía en ninguna de las propuestas, ya que se considera como el área crítica mínima de fijación para al menos 2 perforaciones para los elementos de fijación en madera, considerando una fijación de  $1/4$ ” (Norma UNE-ENV, 1997). La variación de la longitud de las placas puede incidir en la cantidad de fijaciones que se realizaran en la pletina de acero, generando la oportunidad de colocar 2, 4, 6, 8, 10 o más fijaciones dependiendo de la longitud de la placa de acero. Sin embargo, en este parámetro, la placa dispuesta en el pie derecho se verá limitada por el ancho de la escuadría de la madera. Bajo este paradigma, la longitud varía  $a/3$ , donde “a” corresponde al ancho del pie derecho y a su vez al ancho mínimo de espacio para la fijación.

**Fig. 118**  
Parámetro (1) posición de la placa; (a) placa base de la espiga  $1/3$ ; (b) placa base inferior  $2/3$ ; (c) placa base solera  $3/3$ ; (d) placa base de la espiga  $3/3$

**Fig. 119**  
Parámetro (2) tamaño de las placas; (a) longitud  $1/3$ ; (b) longitud  $2/3$ ; (c) longitud  $3/3$ ; (d) longitud  $5/3$ .

La Figura 119a muestra el caso donde la “longitud  $1/3$ ” del ancho del pie derecho permite la posibilidad de colocar 2 fijaciones. La Figura 119b muestra la variación denominada “longitud  $2/3$ ” del ancho del pie derecho,



que permite la posibilidad de cuatro fijaciones en los extremos de la placa y una en el centro. La Figura 119c muestra el caso “longitud de 2/3” del ancho del pie derecho, que permite el uso de seis fijaciones cercanas al borde y tres en el centro de la placa. En el caso descrito por la Figura 119d “longitud de 5/3”, solo la placa inferior, anclada a la solera, permite el anclaje de diez perforaciones cercanas al borde y cinco en el centro de la placa.

El Parámetro (3) evalúa la orientación y posición del cable (ver Figura 120) en función de unir las placas de acero superior e inferior. Este parámetro explora la disposición del cable en función de los puentes atirantados, generando una representación geométrica de estas morfologías a través de la disposición de los cables para unir ambas placas de acero. Según explica Carrión et al. (2005), es fundamental analizar la distribución y el arreglo en los sistemas de suspensión, ya que esto afectara al desempeño y comportamiento estructural del refuerzo. La Figura 120 resume las iteraciones propuestas que incluyen cables cruzados en forma de “X”, similar a la cruz de San Andrés (Figura 120a), cables dispuestos en forma de “M”, sin sobresalir de la sección del pie derecho, (Figura 120b), y cable dispuesto forma de “V” invertida (Figura 120c).

Finalmente, el Parámetro (4) modo de anclaje entre las placas de acero y cable, aborda las posibilidades del modo de anclaje entre la placa y el cable, como se observa en la Figura 121. La Figura 121a propone que el cable que conecta ambas placas se amarre directamente a través de la placa previamente perforada. La segunda variación Figura 121b propone añadir una sujeción a la placa a través de la cual se amarre el cable. El objetivo de la segunda variante es que el cable no quede aplastado contra el pie derecho o solera, facilitando su instalación y desempeño.

Posterior a la etapa de iteración de variables se estudia la selección de la mejor propuesta en base a los objetivos que debe satisfacer la solución de reforzamiento en la unión (Tabla 5. Segmentación de objetivos.), que incluyen:

Fig. 120 Parámetro (3) orientación y posición del cable; (a) en “X”; (b) en “M”; (c) en “V” invertida.

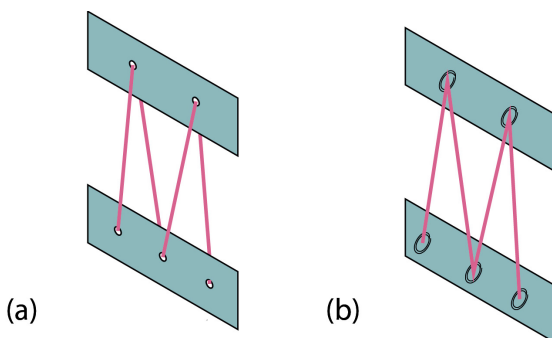
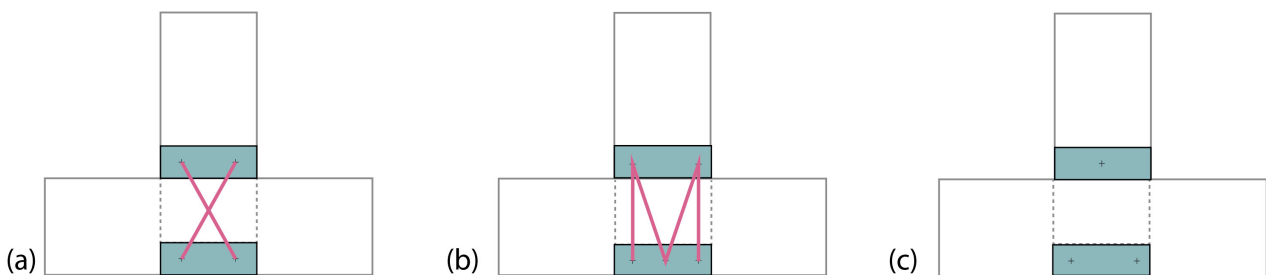


Fig. 121 Parámetro (4) modo de anclaje entre placas de acero y cables

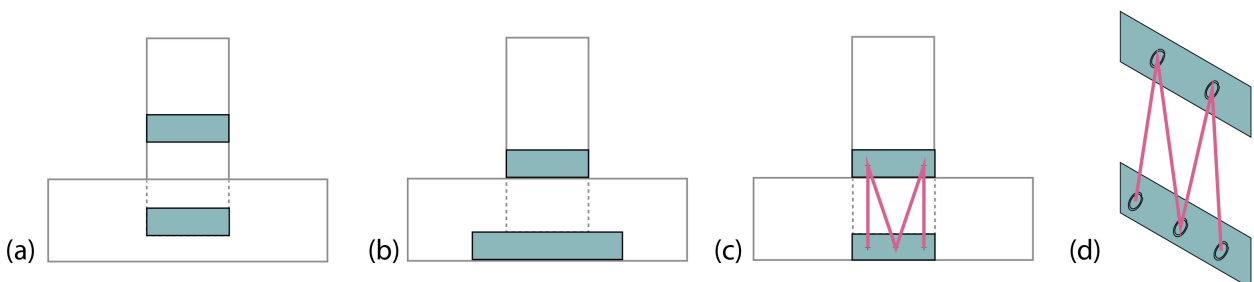
aumentar su capacidad resistente, disipar energía y evitar la separación de las piezas (pie derecho y solera). Además, se espera que la propuesta final tenga un diseño innovador y que intervenga en la menor medida posible la unión carpintera. Por otro lado, se debe tener en cuenta que el refuerzo debe ser fácil de instalar, además de poder instalarse en obra, por lo que se deben considerar la existencia de revestimientos de piso y muros. A partir de esto, en la Figura 122 se observa la selección de opciones para diseñar el refuerzo.

Dentro de la selección de los parámetros (1) posición de la placa y (2) tamaño de las placas se considera como la mejor iteración del parámetro (1), aquella que posiciona a la placa inferior a la altura de la espiga, con una separación del borde inferior de la solera de  $3/3$  del ancho del pie derecho (ver Figura 122a). Esta característica facilitará la instalación del refuerzo en obra considerando la existencia de revestimientos de suelo. En relación con el Parámetro (2) tamaño de las placas, se considera como la variante más optima aquella que aumenta la longitud  $5/3$  de la placa inferior (ver Figura 122b). Esta opción permite que las fijaciones clavadas para conectar la placa a los elementos de madera se ubiquen en los extremos de la placa sin interferir la espiga de la unión. Esta característica hace que la solución considere como una opción poco invasiva.

Para terminar de definir la idea que incorpora “placas de acero con cables”, y considerando las elecciones respecto a los Parámetros (3) orientación del cable y (4) modo de anclaje de los cables, se considera que la posición del cable en forma de “M” (ver Figura 122c) podría adaptarse mejor a la longitud de placa inferior, al tener más puntos de anclaje que las en forma de “V” invertida y “X”. Por otro lado, y respecto al modo de ligadura del cable y al anclaje entre placas, se considera que la opción de añadir un elemento de sujeción a la placa (soldado) es el más conveniente, ya que evitaría la perforación de la placa en más puntos, lo que se puede traducir en pérdida de área crítica de conexión útil (ver Figura 122d). Además, esto facilitaría la instalación de la solución en obra, ya que el cable no quedaría posicionado detrás de las placas, como podría ser en la otra solución.

Antes de pasar a la etapa de definición técnica del prototipo, se evalúa la factibilidad de construcción de ambas propuestas. En este sentido, existe un primer obstáculo respecto al material viscoelástico que se sugiere como complementario de las placas metálicas. Se evaluó la posibilidad de utilizar caucho en ambas soluciones, no obstante, y para efecto de estudios posteriores en el marco de la investigación (experimentales y numéricos) se requiere conocer las propiedades mecánicas del material. Esto implica

Fig. 122 Selección de opciones dentro de la iteración; (a) posición placa de acero en base de la espiga  $3/3$ ; (b) longitud  $5/3$ ; (c) disposición de los cables en “M”; (d) anclaje de cables exterior.



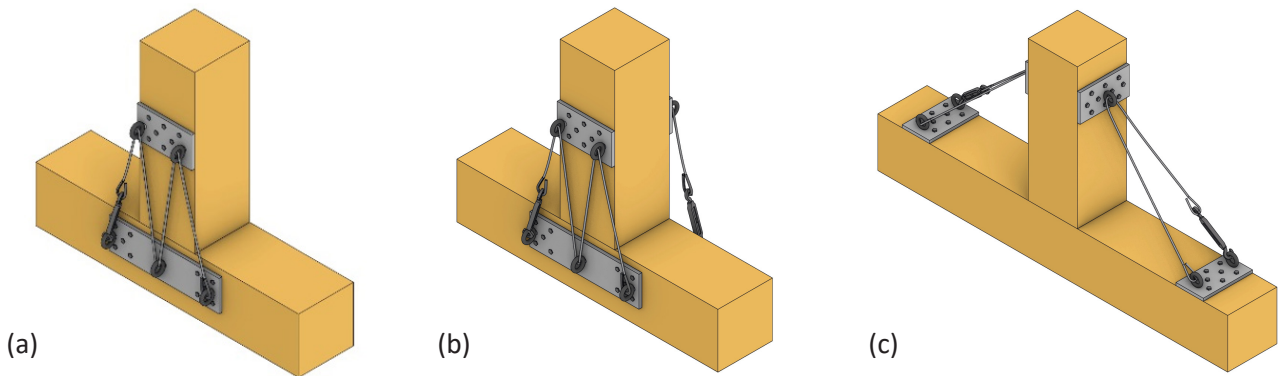


Fig. 123

Propuestas de diseño a partir de la iteración: (a) refuerzo de placa frontal; (b) refuerzo doble placa frontal; (c) refuerzo de placa lateral.

realizar ensayos de caracterización que están fuera del alcance de esta tesis de investigación. Dado lo anterior, se opta por la opción de utilizar solo acero, pero en diferentes versiones del material (placas y cables). De este modo, se opta por descartar la construcción de la idea “placas de acero con material viscoelástico”, que contemplaba el uso de placas de acero y otro material viscoelástico.

Considerando la construcción de la idea “placas de acero con cables”, también se detecta un segundo obstáculo: la posibilidad de implementar esta solución en muros que serán revestidos. El concepto final de esta idea considera el uso de sujeciones tipo argollas, soldadas a las placas, que servirán para insertar los cables que conectarán las placas inferior y superior. Estas argollas sobresaldrían del plano del muro, lo que dificultaría la colocación de un revestimiento (planchas, revoques, etc.). Para mitigar esta dificultad, se contempla la posibilidad de agregar una variante de esta solución de refuerzo que permita revestir posteriormente los muros. Se propone una solución basada en el concepto “refuerzos laterales compuesto”, en base a los mismos parámetros establecidos en las iteraciones previamente realizadas (ver Figura 122), pero con la variación en la selección del parámetro (3) orientación del cable, en forma de “V” invertida (ver Figura 120c).

Finalmente, se concretaron tres versiones del refuerzo, como se ilustra en la Figura 123. La primera versión corresponde al “refuerzo de placa frontal”

### 5.1.2 ESTUDIO ANALÍTICO PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL REFUERZO

El presente apartado se enfoca en el desarrollo de un estudio analítico para determinar la tensión de carga que afectara a los cables tensores del refuerzo seleccionado, según el ángulo de inclinación y la distancia que posea cuando se le aplique una carga lateral al pie derecho durante los ensayos. El objetivo de esto es establecer el ángulo de inclinación y la distancia entre cada punto de conexión de los cables tensores en el diseño. En primera instancia, se realizó un diagrama de cuerpo libre del ensamble caja y espiga, considerando las características del ensamble y las condiciones de carga y contorno que se utilizarán posteriormente en los ensayos en laboratorio. El análisis del cuerpo libre permite representar de manera gráfica las fuerzas que actúan en un determinado objeto de manera aislada, y las fuerzas desconocidas que aparecen en las ecuaciones del movimiento en el cuerpo libre.

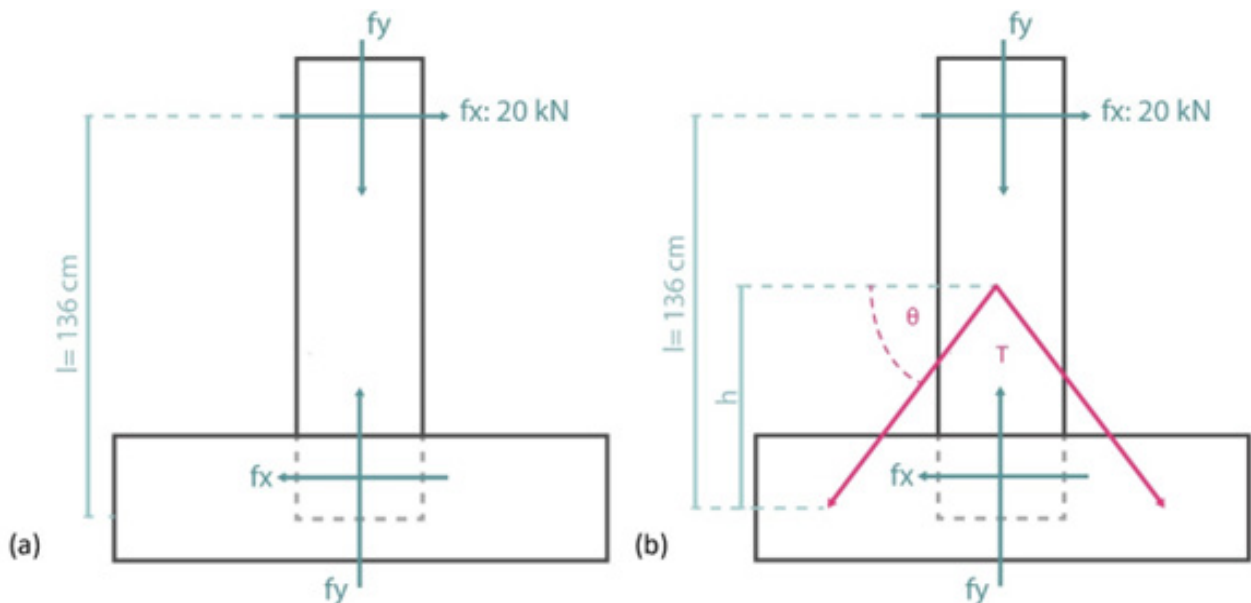
La Figura 124 muestra un modelo simplificado de la aplicación de la carga lateral en el diseño a través de un diagrama de cuerpo libre para el caso del ensamble caja y espiga con y sin refuerzo. En estos diagramas se muestra la aplicación de una carga superior lateral de 20 kN a una altura de 136 cm, y también una representación de la reacción del ensamble ante la carga. Se espera que la aplicación de la carga en este punto provoque una reacción en los ejes X e Y del pie derecho, y otra reacción inversa en la conexión entre la caja y la espiga de la unión, como se observa en la Figura 124a. Por otro lado, la Figura 124b representa el diagrama de cuerpo libre con el diseño del refuerzo simplificado en solo dos diagonales que convergen y representan el cable tensor de la solución de refuerzo. En este segundo diagrama aparece la tensión del cable T, el ángulo del tensor  $\theta$  y la distancia h que representa la altura entre la sujeción inferior en la solera y superior en el pie derecho.

A partir del diagrama de cuerpo libre del ensamble caja y espiga con refuerzo de la Figura 124b, se utiliza la (2) para entender los factores condicionantes de la tensión que ejercerá el cable de la solución de refuerzo al aplicarle una carga superior lateral de 20 kN a una altura de 136 cm. El objetivo de este análisis es determinar la mejor correlación entre la disposición del cable en relación con el ángulo  $\theta$  y la distancia h entre las sujeciones, y la tensión T que ejercerá el cable durante la aplicación de la carga durante el ensayo en laboratorio. Como se observa en la Figura 124b, la tensión del cable T depende de la carga aplicada multiplicada por la distancia a la que se aplicara la carga lateral l, dividido por la distancia entre las fijaciones h, y dependiente de un ángulo  $\theta$ . Se analizaron por separado las tres propuestas de refuerzo (ver Figura 123) con el objetivo de definir en detalle la disposición de todos los elementos que conforman el refuerzo.

$$T = \frac{fx * l}{h * \cos\theta} \tag{2}$$

Fig. 124  
Estudio analítico: (a) Diagrama de cuerpo libre en ensamble caja y espiga; (b) diagrama de cuerpo libre en ensamble caja y espiga con refuerzo.

A partir de la aplicación de la formula (2) para cada caso, se elaboró un gráfico de fuerza F v/s distancia h, que gráfica la tensión T que el cable tendrá



que ejercer cuando se aplique carga lateral de 20 kN, y la distancia  $h$  que deberá existir entre las sujeciones del cable en la placa de acero para soportar dicha carga. En esta gráfica se delinea como parámetro en el gráfico una fuerza  $F$  de 20 kN (línea segmentada), con el objetivo de delimitar el ángulo  $\theta$  y la distancia  $h$  que se puede aplicar a cada solución de refuerzo cuando la tensión  $T$  máxima ejercida por el cable sea 20 kN. El uso de este gráfico permitirá obtener la tensión que el cable tendrá que resistir cuando se le aplica a la unión una carga de 20 kN. Por ende, la restricción utilizada en los gráficos se encargará de que esta tensión no sobrepase la carga máxima aplica. De este mismo modo, servirá como un parámetro de diseño para el ángulo que poseerá el cable tensor y la distancia entre ambos puntos de sujeción. En base a lo anterior, se opta por que la selección del ángulo  $\theta$  y la distancia  $h$  entre las sujeciones para el cable se encuentre bajo los 20 kN.

La Figura 125 muestra el análisis realizado para el primer prototipo de refuerzo denominado “refuerzo de placa frontal”, compuesto por placas y cables en solo una de las caras frontales del ensamble. En este caso, se aprecia la aparición de momento en la unión debido a la restricción generada en una de las caras por el refuerzo. Además, se observa que solo los ángulos de 15°, 30° y 45° se encuentran bajo la restricción de fuerza de 20 kN para el cable a partir de una distancia  $h$  de 180 mm, por tanto, son apropiados para disponer el cable. Mientras que la curva para un ángulo de 75° se encuentra fuera de la restricción estipulada, debido a que esta necesitaría una distancia  $h$  mayor a 300 mm por ende queda fuera del estudio.

En la Figura 126 se despliega el análisis realizado para el segundo prototipo, referido al refuerzo “doble placa frontal” dispuesto en ambas caras del ensamble. En este caso no se genera momento y todos los ángulos estudiados a diversas distancias  $h$  entre las sujeciones logran satisfacer el requerimiento de generar tensiones bajo los 20 kN. Para el caso de un ángulo 15°, 30°, 45° la distancia entre las sujeciones podría llegar a ser a partir de los 80 mm, mientras que para el caso de un ángulo 75° la distancia mínima entre las sujeciones deberá ser de 180 mm. Sin embargo, los ángulos de 15°, 30°, 45° al poseer ángulos bajos, la longitud de la placa en la solera inferior aumenta considerablemente. En contraste, en el caso del ángulo de 75°, es la distancia entre las sujeciones se incrementa.

En la Figura 127 se observa el análisis realizado para el tercer prototipo, referido al refuerzo de placa lateral por ambos lados del pie derecho. En este caso, se observa que el ángulo de 75° no logra quedar bajo los parámetros establecidos para los ensayos y queda descartado. Mientras que para el caso de un ángulo de 15°, 30° y 45°, la distancia mínima aceptada bajo la restricción de 20 kN será de una distancia entre las sujeciones de 180 mm.

En conclusión, a partir del análisis realizado en los gráficos de fuerza  $v/s$  distancia de las sujeciones  $h$  por solución de refuerzo, se seleccionan el caso de “refuerzo doble placa frontal” y el “refuerzo de placa lateral”, mientras que se descarta la primera solución denominada “refuerzo de placa frontal” debido a la distribución geométrica que producen los ángulos que se encuentran bajo la restricción estipulada. Además, se espera se produzca momento considerando la fijación asimétrica que supondría la instalación del refuerzo en una sola cara del ensamble. Este efecto podría ocasionar daños no deseados

Fig. 125

Estudio analítico: (a) diagrama cuerpo libre en refuerzo de placa frontal solo por el lado frontal de la unión; (b) gráfico fuerza  $v/s$  distancia.

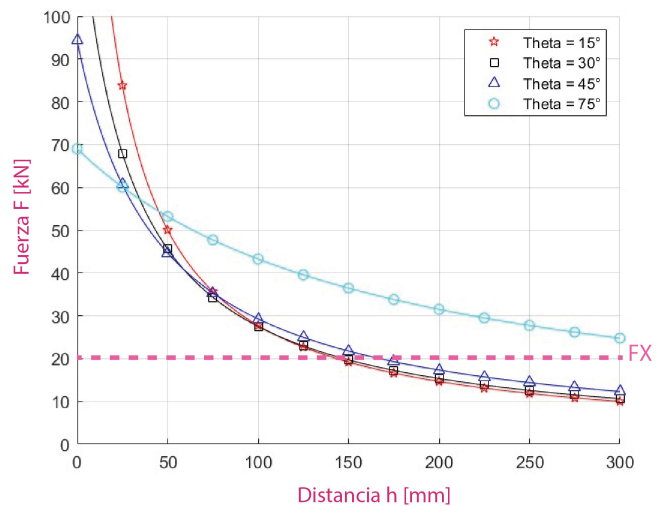
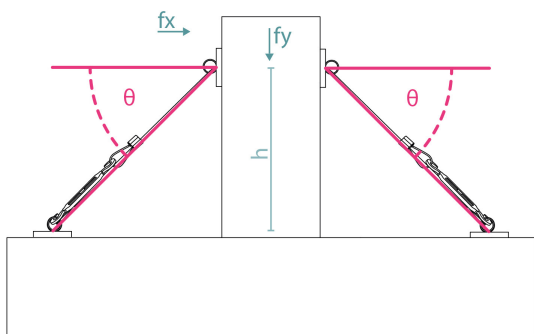
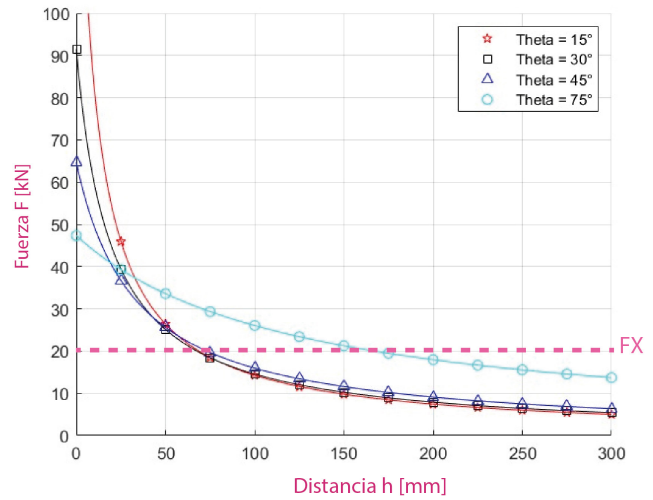
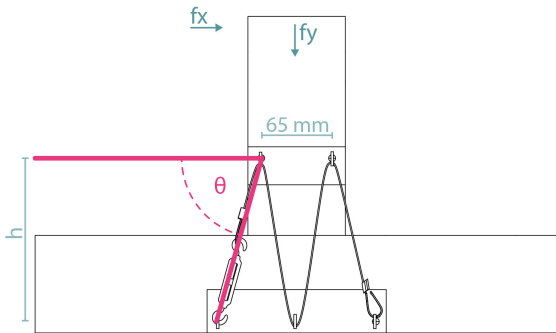
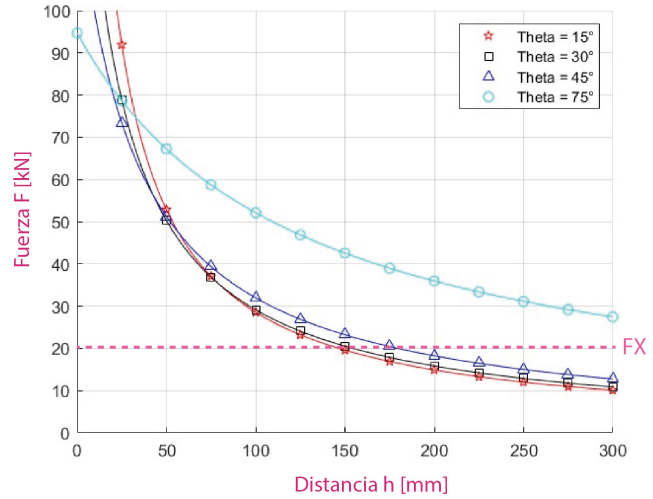
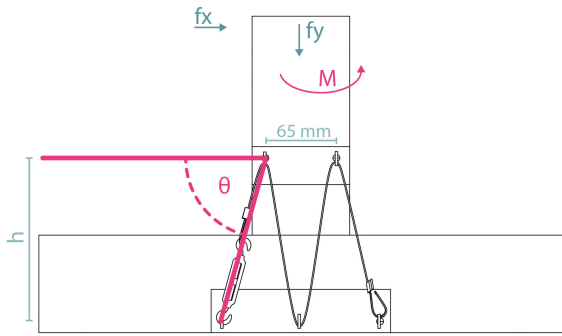
Fig. 126

Estudio analítico: (a) diagrama cuerpo libre en refuerzo doble placa frontal; (b) gráfico fuerza  $v/s$  distancia

Fig. 127

Estudio analítico: (a) diagrama cuerpo libre en refuerzo de placa lateral por ambos lados del pie derecho; (b) gráfico fuerza  $v/s$  distancia de las sujeciones.

antes de alcanzar la carga máxima durante la aplicación de la carga lateral en los ensayos experimentales. Por otro lado, en el segundo caso denominado “refuerzo doble placa frontal”, se selecciona la opción de un ángulo de 75° con una distancia  $h$  entre las sujeciones de 300 mm, obteniendo una fuerza aplicada en el cable de 15 kN, mientras que, para el tercer caso, el “refuerzo de placa lateral” se selecciona la opción un ángulo de 45° con una distancia  $h$  de 250 mm, generando una fuerza aplicada en el cable tensor de 15 kN.



### 5.1.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Las soluciones de “refuerzo doble placa frontal” y el “refuerzo de placa lateral”, si bien presentan morfologías diferentes, se basan en el mismo diseño base en cuanto a los elementos utilizados para construir la solución de refuerzo. Estos elementos que componen la solución fueron seleccionados de acuerdo con las especificaciones técnicas de cada marca disponible en el mercado, considerando una resistencia a la rotura superior a las 20 kN con el objetivo que estos se encuentren sobre la carga superior lateral que será aplicada en los ensayos del laboratorio, asegurando de que puedan soportar al menos 20 kN.

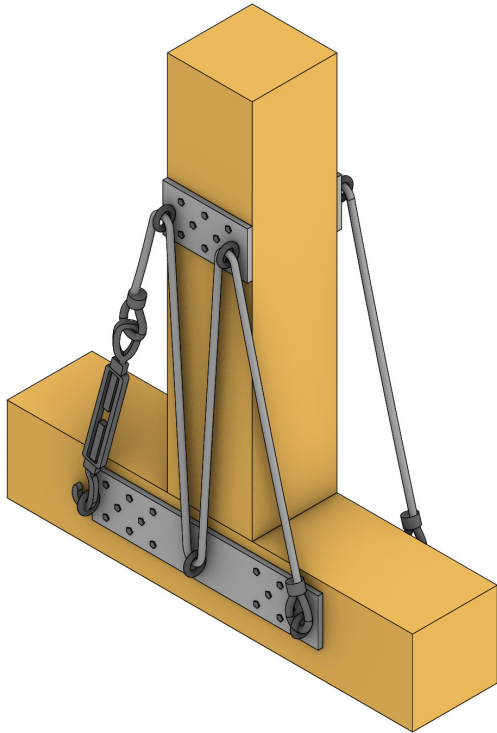
En particular, ambas soluciones se constituyen con pletinas de acero de 5 mm de espesor y largo variable, según lo requiera la pieza. En las placas se soldarán argollas de acero de 5 mm de espesor en los puntos de giro del cable. Mientras que, para el tensor se utilizará cable de acero de  $\frac{1}{4}$ ”, abrazaderas para cable de  $\frac{1}{4}$ ”, tensores de ojo – gancho de  $\frac{1}{4}$ ” x 4”, y guardacabo de  $\frac{1}{4}$ ”. Por otro lado, las fijaciones dentro de las placas de acero se encuentran establecidas bajo la normativa del (Norma UNE-ENV, 1997) en la cual se utiliza una fijación de  $\frac{1}{4}$ ” con una distancia de 25 mm entre ellas.

La solución de “refuerzo doble placa frontal” se compone de dos placas de acero, una superior fijada al pie derecho, y otra inferior anclada a la solera y dispuesta a la altura y en línea con la arista inferior de la espiga. Las placas tienen un largo de 90 mm y 240 mm, respectivamente (ver Figura 128). La placa inferior está fijada con cinco tirafondos en ambos extremos para evitar interferir con la unión carpintera. Además, tiene soldadas tres argollas de 5 mm de espesor, dos en los extremos y una en el centro. Por otro lado, la placa superior se compone de dos argollas en los extremos, y está fijada con 8 tirafondos dispuestos cada 25 mm de distancia. Ambas placas se conectan mediante un tensor de ojo y gancho, dos guardacabos, dos abrazaderas para cable  $\frac{1}{4}$ ”, y un cable de acero de  $\frac{1}{4}$ ”, tal como muestra la Figura 129.

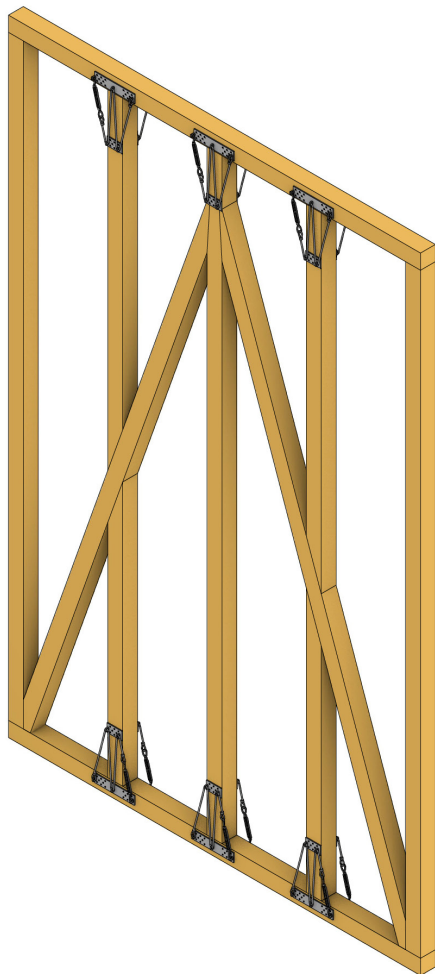
El refuerzo frontal es apto para ser instalado en estructuras de madera que no serán posteriormente revestidas, cómo por ejemplo en muros vaciados donde se decide dejar algunos muros a la vista, ya que las argollas de sujeción del cable podrían dificultar el revestimiento de la estructura. Dejar muros sin revestir cómo testigo de historia constructiva de las viviendas es una práctica muy común en las reformas de las construcciones históricas en Valparaíso (ver Figura 130). Asimismo, el diseño de esta solución considera la instalación in situ y, por lo tanto, la existencia de revestimientos de piso (entablado u otro), por lo que la placa inferior se distancia de la arista inferior de la solera 30 mm por encima del suelo.

Fig. 128

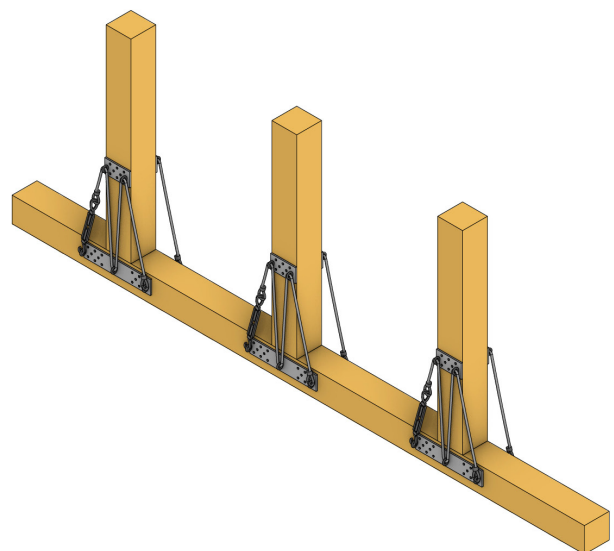
Solución de refuerzo “doble placa frontal” visualización: (a) en ensamble caja y espiga; (b) diagrama solución de refuerzo instalado en estructura de muro.



(a)



(b)

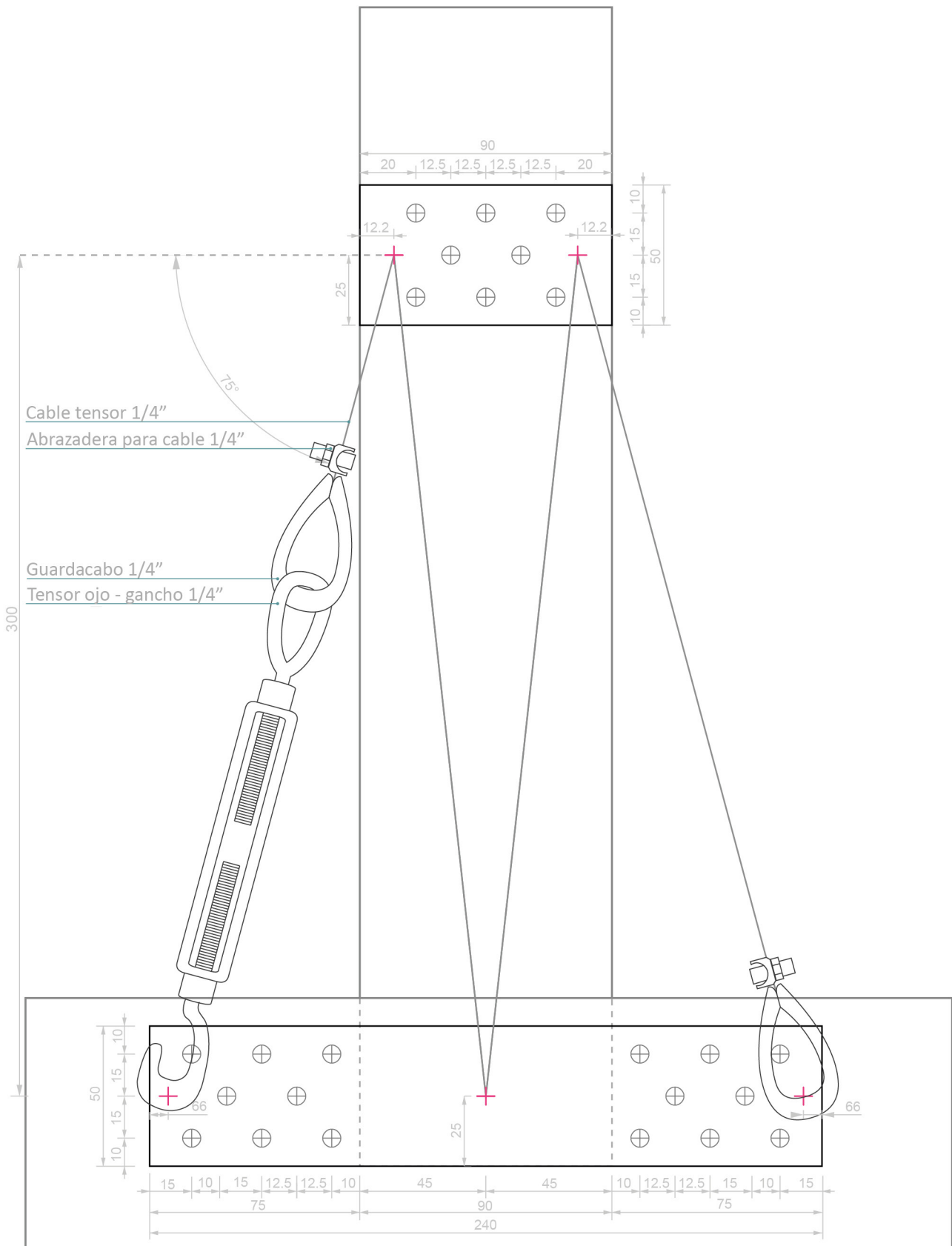


# PLANIMETRÍA FRONTAL

ESCALA 1:2

Fig. 129

Planimetría "solución de refuerzo doble placa frontal", vista frontal. Medidas en mm y pulgadas.



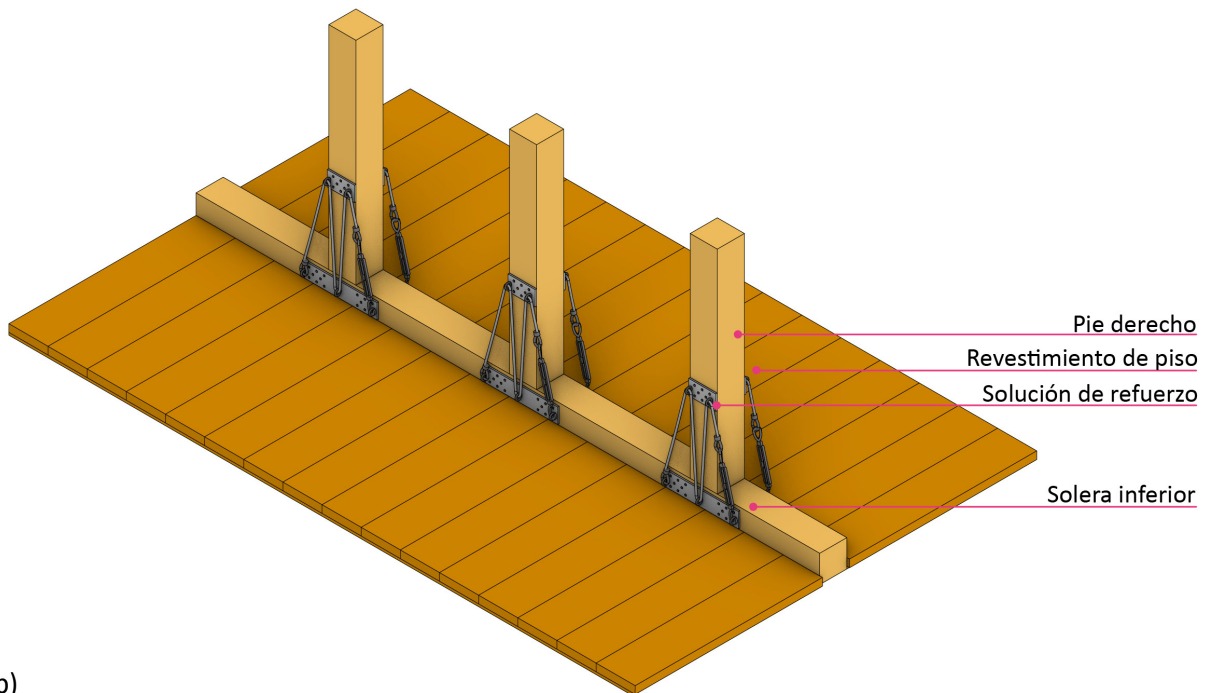
## SIMBOLOGÍA

+ Argolla

⊕ Posición Tirafondo 1/4"



(a)



(b)

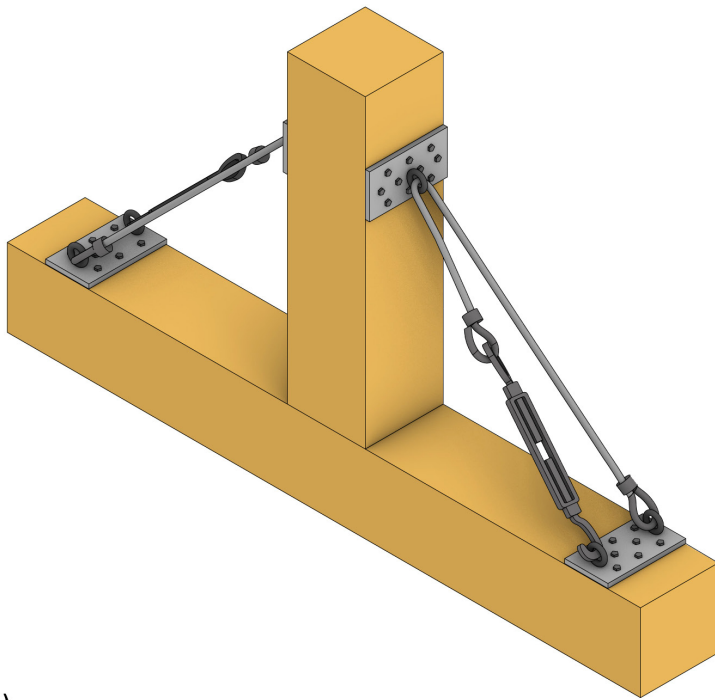
**Fig. 130**

Entablado de madera como revestimiento de los entresijos de inmuebles históricos de entramado de madera: (a) fotografías entramado de muro a la vista en galería de arte en el cerro Alegre; (b) imagen objetivo del refuerzo "solución de refuerzo doble placa frontal" dispuesto en obra.

La solución de "refuerzo placa lateral", que consiste en una solución lateral anclada a ambos lados del pie derecho, considera los mismos elementos utilizados en la solución de "refuerzo doble placa frontal", pero dispuestos de diferente forma. La solución de "refuerzo de placa lateral" se compone por dos placas de acero, una superior anclada lateralmente al pie derecho, y otra inferior anclada en el canto superior de la solera inferior, con dimensiones de 50 mm de ancho, 90 mm de largo y de 5 mm de espesor. Las placas tienen soldadas argollas a través de las cuales pasa el tensor o cable de acero que conecta las placas. La placa inferior tiene dos argollas de 5 mm de espesor en ambos extremos, y está asegurada con 8 tirafondos. Por otro lado, la placa superior tiene una argolla central y cuenta con 10 fijaciones. Ambas placas se unen mediante un tensor de ojo - gancho de  $\frac{1}{4}$ " x 4", un guardacabo cable de acero  $\frac{1}{4}$ ", y una abrazadera para cable de  $\frac{1}{4}$ ", todos anclados a las argollas soldadas a la placa de acero (ver Figura 132). Este sistema se replica en ambos lados del pie derecho (ver Figura 131), emulando el mismo sistema que tienen las riostras en los sismos, ya que solo uno de los lados responderá ante cargas laterales dependiendo de su origen.

Fig. 131

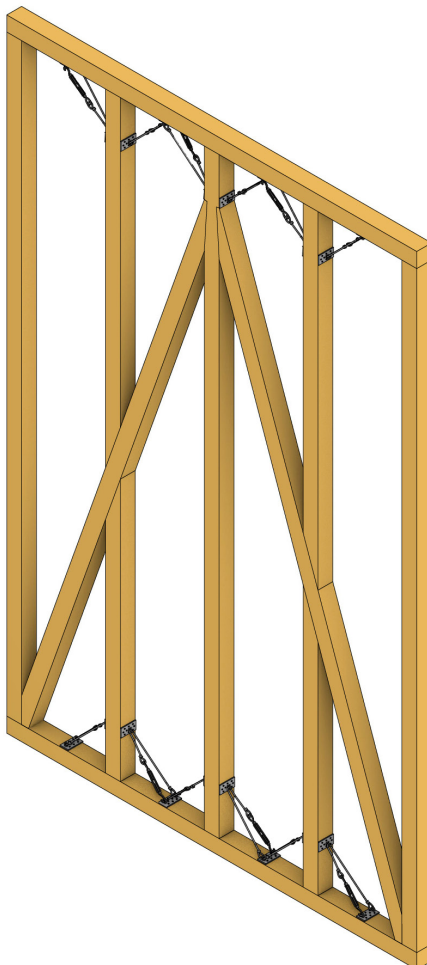
Solución de refuerzo "placa lateral" visualización: (a) en ensamble caja y espiga; (b) diagrama solución de refuerzo instalado en estructura de muro.



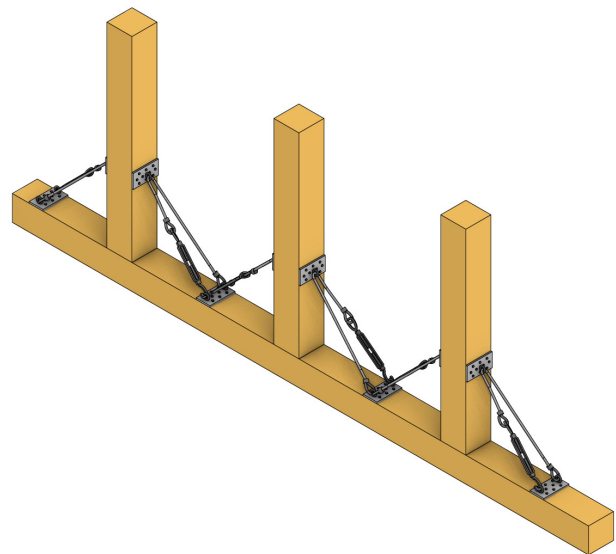
(a)

Fig. 132

Planimetría Solución de refuerzo "placa lateral": (a) vista frontal y (b) en planta. Medidas en mm y pulgadas.



(b)

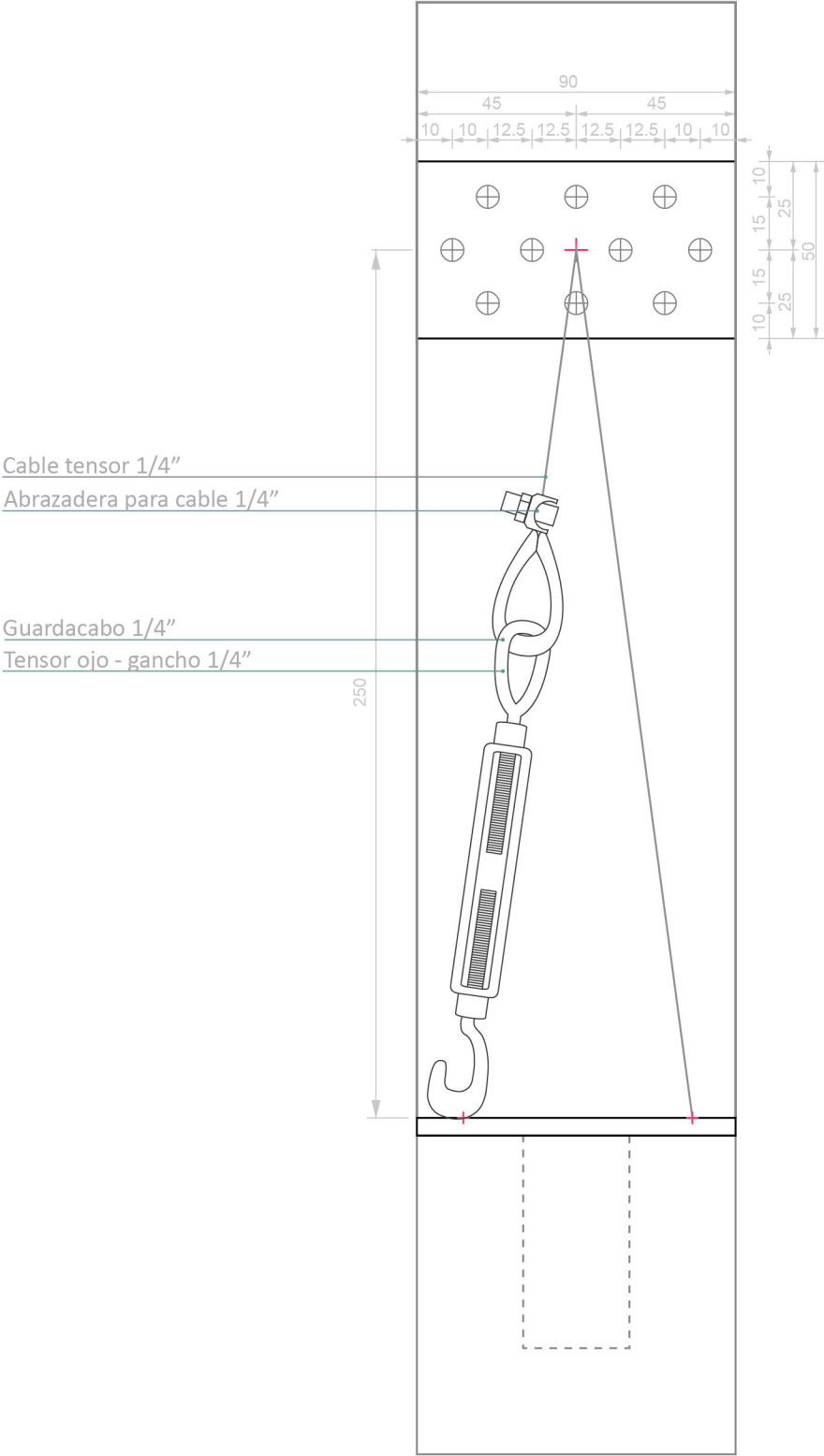




# PLANIMETRÍA LATERAL

ESCALA 1:2

Fig. 133  
Planimetría Solución de refuerzo "placa lateral", vista lateral. Medidas en mm y pulgadas.



## SIMBOLOGÍA

- + Argolla
- ⊕ Posición Tirafondo





HOTEL & TERRAZA  
BO

BO  
H

## CAPÍTULO 6: PROTOTIPADO Y PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA VERIFICAR EL COMPORTAMIENTO DE LAS SOLUCIONES DE REFORZAMIENTO

El Capítulo 6 del presente trabajo expone el proceso de prototipado y construcción de dos soluciones de refuerzo derivadas de la aplicación de la metodología propuesta. Además, detalla un plan de trabajo para ejecutar un programa experimental y validar la efectividad de la propuesta en términos estructurales ante cargas laterales o sísmicas. Es importante mencionar que solo se dejará esbozado el programa, mas no se muestran los resultados de los ensayos que serán realizados en los próximos meses como parte del trabajo

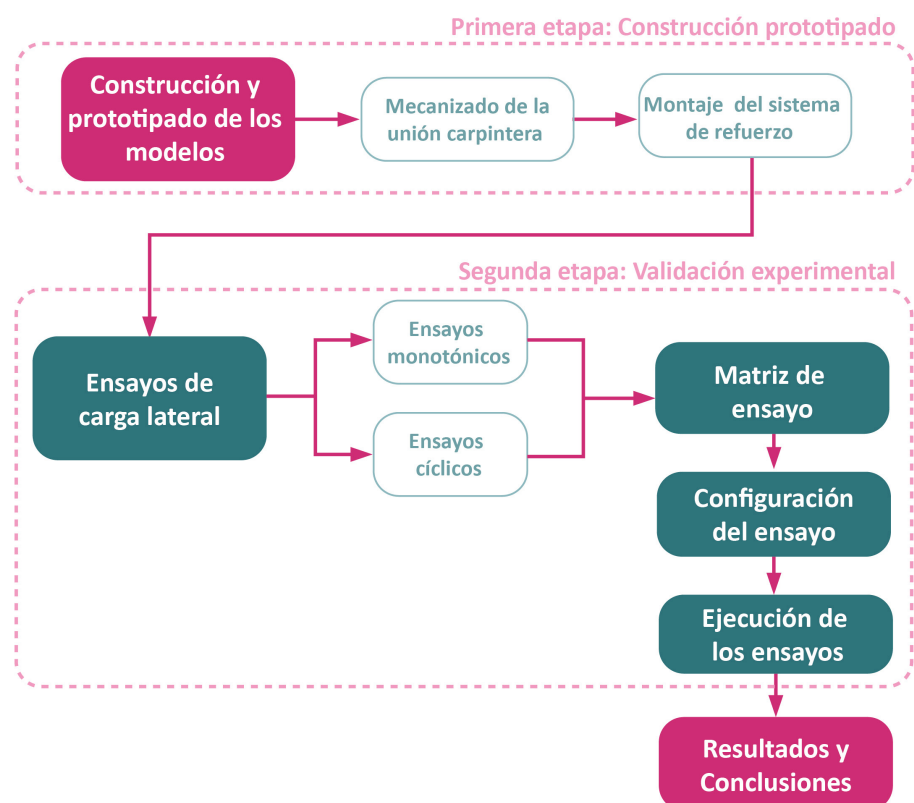


Fig. 134  
Diagrama de metodología para desarrollar el prototipado y la validación experimental de las soluciones de reforzamiento

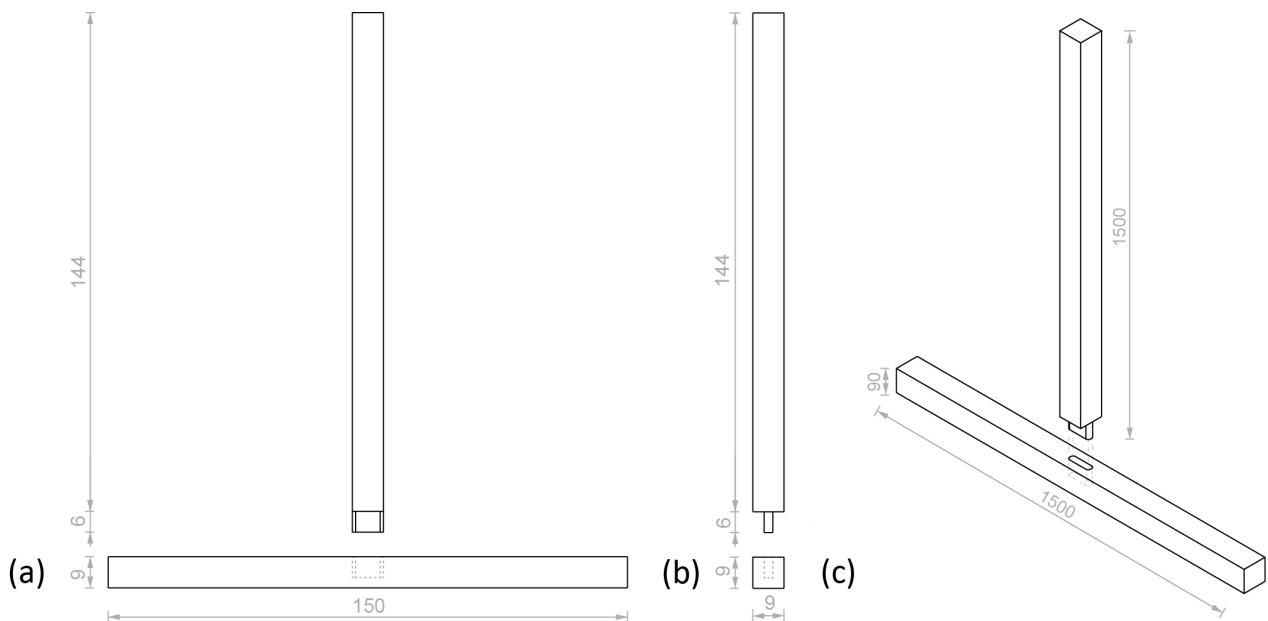
programado en el proyecto de investigación donde se enmarca esta tesis (ver Figura 134).

Este capítulo se divide en dos partes. Primero, el apartado 6.1 aborda la construcción del modelo de la unión caja y espiga a escala real, a través de métodos de fabricación robotizada y el montaje de las soluciones de refuerzo. Por otro lado, en el apartado 6.2 se detalla el programa experimental, incluyendo la definición y descripción de los modelos y ensayos (matriz de ensayo), así como la configuración de los ensayos, las condiciones de carga y contorno, y los métodos para llevar a cabo el análisis de los resultados. En esta propuesta, se considera el ensayo de modelos con y sin reforzamiento, con el objetivo de comparar los resultados en términos de capacidad de carga, rigidez, mecanismos de colapso, entre otros.

### 6.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS

El presente apartado aborda la descripción de la construcción de los modelos de la unión caja y espiga, con y sin reforzamiento, que serán ensayados a escala real. En la construcción de este ensamble se utilizaron piezas de madera de pino Oregón cepillado y previamente dimensionados por la distribuidora, con una sección de 4"x4" y un largo de 150 cm (ver Figura 135). El modelo base consideró el uso de dos piezas de madera. La primera es para la solera inferior donde se mecanizó la caja en el centro de la pieza. La segunda para configurar el pie derecho que presenta el labrado de la espiga en el extremo inferior. El mecanizado de las piezas y construcción de la caja y espiga se realizó mediante la implementación de métodos de fabricación robotizada con un robot industrial MODELO KUKA Quantec KR 210 R3100-2 C en el Laboratorio de Construcción y Manufactura Robótica del Departamento de Arquitectura de la UTFSM en el Campus San Joaquín.

Fig. 135 Diagrama configuración del ensamble caja y espiga; (a) elevación frontal; (b) elevación lateral; (c) isométrica.





### 6.1.1 MECANIZADO ROBÓTICO

En la última década, los métodos de construcción robotizados han ganado terreno, especialmente en el área de la construcción con madera (Cortés, 2002; L. González & Maino, 2019; Poblete, 2017; Quitral et al., 2020). En particular, existen significativos avances en el ámbito de la carpintería de armar, un método de construcción avanzado que permite la automatización del mecanizado de las uniones carpinteras mediante el uso de robots industriales. El uso de esta tecnología permite desarrollar modelos físicos con alta precisión, eficiencia en la producción, y reduciendo los costos. Además, el mecanizado robótico permite mejorar la capacidad para manejar tareas repetitivas y desarrollar prototipos replicables y escalables en tiempos muy reducidos y sin requerir de mano de obra especializada.

Los robots KUKA industriales son manipuladores multipropósito, programable en tres ejes (X, Y, Z). Cortés (2002); Poblete (2017) explican que estos son manipulados a través de un núcleo de control, donde se crea un gemelo digital (digital twin), generalmente desarrollado en la herramienta Grasshopper, que permite la operación offline del sistema. El diseño paramétrico se realiza con el complemento Furobot, al cual se le integran diversos elementos sensorizados para completar el sistema del gemelo digital y obtener un modelo virtual de la plataforma y sus herramientas. El uso de diseño paramétrico permite crear un entorno que facilita la manipulación, control, precisión y complejidad en el uso de robots industriales. Mediante modelos matemáticos, se pueden gestionar las iteraciones y generar patrones. Esto resulta fundamental, ya que la interacción conjunta de estos elementos aporta un valor mayor que la simple suma de las partes.

González et al. (2017) en el trabajo titulado “Reconstrucción robotizada del patrimonio arquitectónico chileno en madera”, desarrolló un catálogo de uniones carpinteras, empleadas originalmente en inmuebles de Valparaíso de fines del siglo XIX a principios del siglo XX, con el objetivo de especificar los parámetros descriptivos de su geometría, junto con una colección de modelos 3D paramétricos de trayectorias de herramientas adaptativas para facilitar su reproducción implementando técnicas de mecanizado utilizando robots industriales (ver Figura 136). El propósito de este estudio es crear una serie de modelos 3D paramétricos de las conexiones carpinteras encontradas en Valparaíso, con rutas de mecanizado robótico asociativas, considerando la unión como un par constructivo compuesto por dos regiones que encajan entre sí (González et al. 2017). Estos modelos tienen la capacidad de actualizarse automáticamente cuando el usuario modifica los valores de los parámetros geométricos del modelo 3D de la unión carpintera, de la herramienta o de la estación de trabajo del robot (González et al. 2017).

En esta investigación, se adoptaron los métodos desarrollados por González et al. (2017) para el mecanizado de la unión caja y espiga. En particular, el mecanizado robótico de González et al. (2017) consiste en un modelo 3D paramétrico editable del ensamble caja y espiga, el cual se define con un diagrama de nodos implementado en KUKA|prc, lo que permite especificar y simular la celda de trabajo del robot y la herramienta, de esta manera poder editar de manera inmediata la trayectoria para el mecanizado del ensamble. Según explica González et al. (2017) la generación de archivos

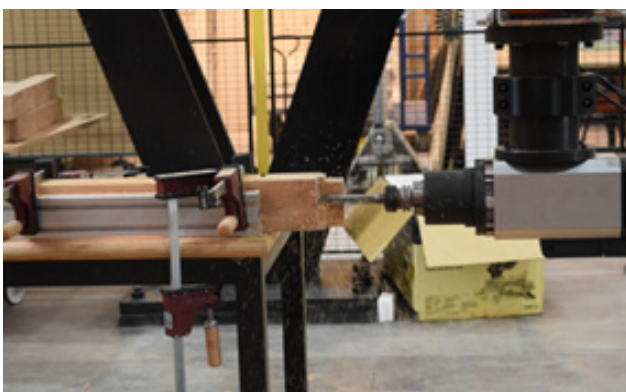
Fig. 136  
Diseño y programación visual de robots industriales KUKA|prc: (a) modelos 3D paramétricos (Quitral et al., 2020); (b) ensamble caja y espiga (González & Maino, 2019).

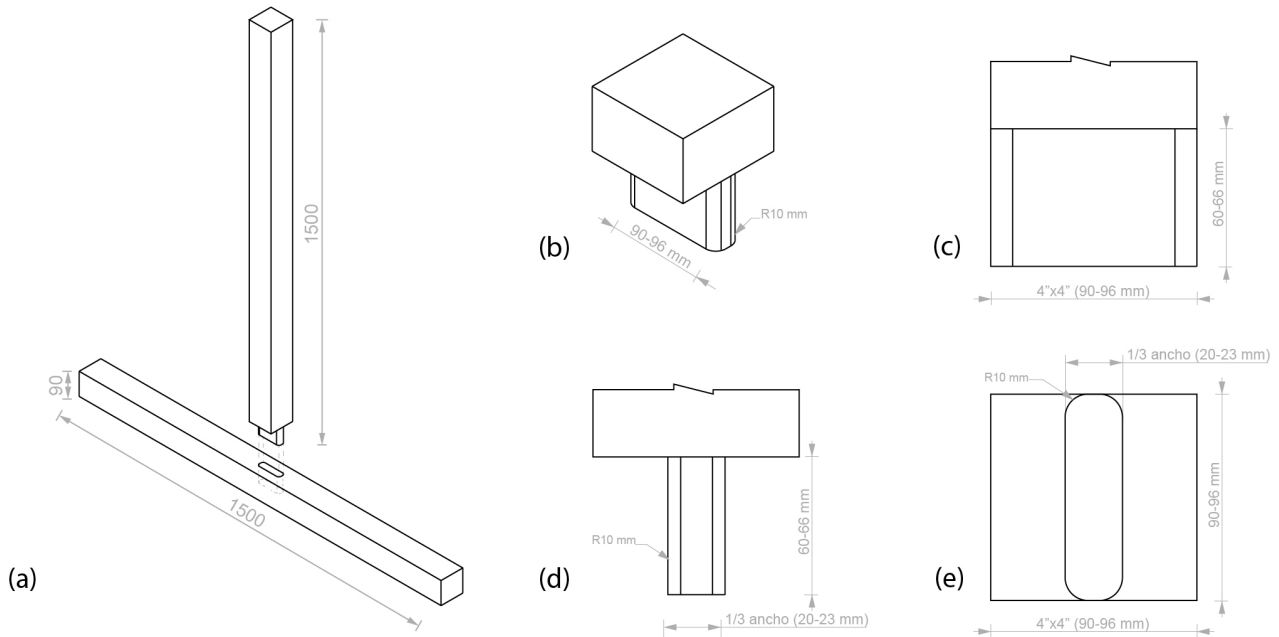
de control numérico en código KRL (KUKA Robot Language) permite que el mecanizado sea ejecutado directamente del robot sin post procesamiento. Así, cuando el modelo paramétrico es intervenido, la salida es doble: la simulación gráfica de la trayectoria del robot y el archivo \*.src, requerido por el robot para realizar la tarea programada por el usuario.

La muestra seleccionada para realizar los ensayos es representativa de las condiciones observadas en los edificios tradicionales de entramado de madera en Valparaíso. Para construir los modelos se utilizó madera de pino Oregón con las dimensiones que se detallan en la Figura 137a, que muestra el modelo compuesto por dos elementos de sección cuadrada 4"x4" con una longitud de 1500 mm cada uno. Las piezas utilizadas son cepilladas, lo que reduce su sección, obteniendo piezas de entre 90 y 96 mm de sección. La espiga y la caja de la unión se mecanizan utilizando una fresa helicoidal rompe viruta de 3 filos de 20 mm de diámetro, dispuesta en el cabezal del robot (ver Figura 138), lo que permite una gran precisión en su construcción. Respecto a la geometría del ensamble, se consideran las relaciones que muestra la Figura 137, en función de la sección específica de las piezas. Como promedio, tanto la espiga como la caja del ensamble tienen son de 90x30x60 mm. Debido al mecanizado con fresa, las esquinas de las piezas tienen un remate redondeado con un radio de 10 mm (ver Figura 137). Se construyeron 6 modelos de uniones.

El mecanizado de los modelos se realizó en el Laboratorio de Construcción y Manufactura Robotizada de la Universidad Técnica Federico Santa María, campus Santiago San Joaquín. Este laboratorio está equipado con una KUKA Quantec KR 210 R3100-2 C, montada a cielo en un eje de desplazamiento lineal KL 4000 1CA C de 10 m sobre un foso mecánico de 2.4 m de profundidad (ver Figura 138 y Figura 139).

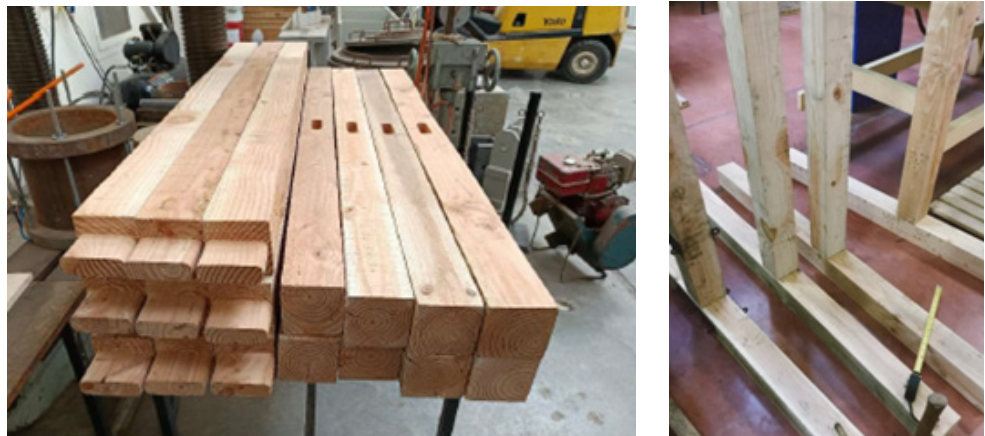
Fig. 138  
Proceso de mecanizado robótico del ensamble caja y espiga.





**Fig. 137**  
 Diagrama: (a) Ensamble caja y espiga; (b) isométrica espiga (c) elevación frontal espiga; (d) elevación lateral espiga; (e) elevación inferior espiga.

**Fig. 139**  
 Ensamble caja y espiga en proceso de mecanizado; (a) ensamble separado; (b) unión carpintera ensamblada.



### 6.1.2 MONTAJE DE LOS SISTEMAS DE REFORZAMIENTO

Una vez listos los modelos se procedió con la construcción y montaje de los reforzamientos en las uniones. Este procedimiento incluyó tanto la fabricación de los elementos de refuerzo como su ensamblaje, desarrollándose de manera coordinada y simultánea. El proceso de construcción y montaje se desarrolló progresivamente para las seis uniones carpinteras que serían reforzadas, abarcando desde la fabricación de las placas de acero hasta el montaje del cable de acero. Este proceso se llevó a cabo de forma sistemática para todas las uniones, garantizando la eficiencia y optimización del tiempo, facilitando la integración de los componentes en el sistema de refuerzo de manera segmentada pero coordinada. El proceso de construcción y montaje de las soluciones de refuerzo diseñadas se llevó a cabo en el Laboratorio de Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, Campus Casa Central.

La primera etapa consideró la construcción de las placas de acero para cada solución de refuerzo. Para esto, se utilizó un perfil pletina de 50 x 5 mm x 6 m, que fue posteriormente dimensionada con una sierra ingletadora según

las dimensiones del largo estipulado en las especificaciones técnicas del apartado 5.1.3. El largo correspondiente es de 90 mm para la placa superior y 240 mm para la placa inferior del refuerzo en la solución “doble placa frontal”. Por otro lado, el largo de las placas de la solución “placa lateral” fueron de 90 mm para la placa inferior y superior. Una vez dimensionadas, las placas fueron marcadas y perforadas con una broca de madera con diámetro de  $\frac{1}{4}$ ". Las argollas se realizaron con fierro redondo de  $\frac{1}{4}$ " y se doblaron con una grifa. Una vez obtenido ambos elementos, las argollas de acero fueron soldadas a las placas de acero y, posteriormente, se lijaron y se pintaron de negro (ver Figura 140).



Fig. 140  
Placa de 90 mm; (a) vista frontal; (b) vista lateral.

Para instalar los refuerzos (Figura 141), primero se ensamblaron las piezas de madera a través de la unión carpintera (caja y espiga), posicionando la solera en la parte inferior y el pie derecho sobre este de manera vertical. Luego se dispusieron las placas según las especificaciones técnicas del apartado 5.1.3. En el caso de la solución “placa compuesta frontal”, se marcaron la perforación de los tirafondos de  $\frac{1}{4}$ " x  $1 \frac{1}{2}$ " en la parte frontal de la unión, anclando la placa superior en el pie derecho y la placa inferior en la solera, sin intervenir la unión carpintera con los tirafondos. Por otro lado, en la solución “placa compuesta lateral”, se marcaron la perforación de la placa en el canto lateral del pie derecho y en el canto superior de la solera, por ambos lados de cada elemento de madera. Una vez marcada la posición de cada tirafondo sobre la madera, se realizaron las perforaciones en esta con el taladro eléctrico, con el objetivo de posicionar la placa de acero y fijarla con los tirafondos.



Fig. 141  
Placas fijadas en el ensamblaje; (a) solución “doble placa frontal”; (b) solución “placa lateral”.

Una vez ancladas las placas, se posicionan los tensores ojo – gancho de  $\frac{1}{4}$ " x 4" y los guardacabos de  $\frac{1}{4}$ " en las argollas según las especificaciones técnicas del apartado 5.1.3. En la solución “placa compuesta frontal” (Figura 142a), el tensor se ancla a través del gancho a la argolla inferior izquierda, mientras que por el lado del ojo de este se posiciona un guardacabo. En la



Fig. 142  
Prototipado de las soluciones de refuerzo terminadas: (a) "doble placa frontal"; (b) "placa lateral".

argolla inferior derecha se coloca un guardacabo para terminar el recorrido del cable. En la solución "placa compuesta lateral" (Figura 142b), se repite este proceso, anclando el tensor a través del gancho en la argolla inferior izquierda, y sobre el lado del ojo del tensor se ancla el guardacabo. Finalmente, en la argolla inferior derecha se posiciona el siguiente guardacabo. El cable de acero de  $\frac{1}{4}$ " se dimensiona según el largo correspondiente a cada solución de refuerzo, con el fin de pasar el cable entre las argollas y los guardacabos posicionados, para fijarlo con las abrazaderas tubulares.

Finalmente, se espera que ambas soluciones de refuerzo ayuden a mantener la posición de la unión durante los ensayos, permitiendo que esta mantenga o mejore su capacidad de carga y, a su vez, mejore la disipación de la energía debido al uso de sistema de cable tensor. Este sistema, al funcionar como material semi rígido, mantendrá la unión, pero también permitirá la fricción de elementos para disipar energía, sin que se produzca la separación de la caja y la espiga. En ambos, casos, tanto en la solución de refuerzo de "placa frontal compuesta" como en el de "placa lateral compuesta", se espera que el refuerzo diseñado funcione principalmente a tracción, evitando la separación de los elementos cuando el ensamble comienza a rotar.

## 6.2 ENSAYOS DE CARGA LATERAL PARA LA VALIDACIÓN DE LOS PROTORIPOS

En este apartado se describirán en detalle los programas experimentales de ensayos de carga lateral que se aplicarán a dos soluciones de refuerzo. En esta tesis solo se describirán los métodos y matrices de ensayo, pero no se abordará la ejecución de los ensayos debido a restricciones de tiempo y disponibilidad del controlador del muro de reacción para realizar los ensayos en laboratorio. Los ensayos están programados para iniciar en para septiembre del presente año en el Laboratorio de Ensaye de Materiales LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María USM.

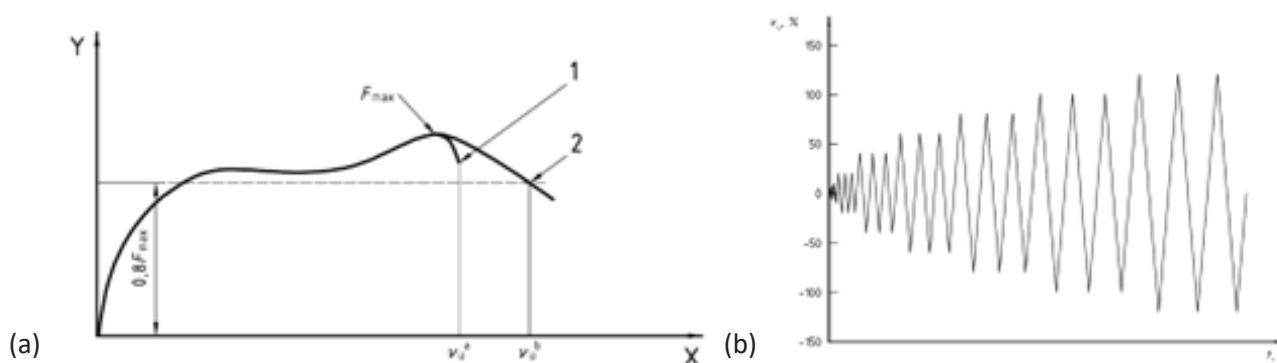
### 6.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Los ensayos de carga lateral generalmente se utilizan para determinar el comportamiento de las estructuras a escala real ante cargas laterales que simulan las sollicitaciones sísmicas. El objetivo de esta parte del trabajo es evaluar el rendimiento estructural de la unión caja y espiga, con y sin soluciones de refuerzo, con el fin de validar las propuestas desarrolladas en las etapas previas de este trabajo. Estos resultados contribuirán a mejorar la comprensión del comportamiento del ensamble caja y espiga en condiciones de carga real, proporcionando datos valiosos para la optimización y fortalecimiento de las estructuras de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso.

Para la ejecución de los ensayos, se consideran los métodos y protocolos que especifica la normativa internacional ISO 16670 (ISO 16670, 2003) para el testeo de uniones realizadas con fijaciones metálicas a través de ensayos cuasi-estáticos cíclicos y reversibles. Los ensayos de carga lateral permiten describir la capacidad de carga de las estructuras a través de la curva de capacidad (Figura 143a), así como sus propiedades elásticas, inelásticas y las demandas representativas impuestas a las uniones en un terremoto. El método descrito en ISO 16670 (ISO 16670, 2003) incluye procesos para determinar las curvas envolventes de las uniones sometidas a cargas laterales cíclicas, que representan las demandas impuestas en un terremoto.

Guindos (2019) explica que los ensayos de carga lateral del tipo monotónico se caracterizan por ser un método experimental en el que la carga crece gradualmente desde cero hasta el fallo sin producirse ninguna descarga. A partir de una curva monotónica fuerza-desplazamiento (Figura 143a), se obtendrán resultados como; la carga en el límite elástico, referido

**Fig. 143**  
Ensayos de carga lateral: (a) curva tipo carga (Y) v/s desplazamiento resultante en ensayos monotónicos (x); (b) protocolo de carga para ensayos cíclicos. Fuente: (ISO 16670, 2003).



a la capacidad de la unión sin minorar; el desplazamiento en el límite de cedencia; la rigidez longitudinal de la unión, referido a la pendiente del tramo elástico de la curva; la capacidad máxima de la unión, es decir, la fuerza máxima alcanzada por la unión independiente de la curva; la carga última, carga en la cual se asume que la unión no es capaz de tolerar ningún desplazamiento adicional; la pendiente del tramo elástico-plástico, referido a la rigidez aparente o pendiente que mejor represente el segundo tramo de la curva; el desplazamiento último, registrado en el valor de la carga última; y por último, la ductilidad, es decir, la relación entre el desplazamiento en el límite de cedencia y el desplazamiento último.

Guindos (2019) explica que el proceso de los ensayos monotónico consiste solo en empujar la pieza a compresión, mientras que, en los ensayos cíclicos o reversibles, el desplazamiento del actuador oscila en determinados ciclos basados en el protocolo de carga que se define desde la curva monotónica (Figura 143b). Además, las curvas obtenidas a partir de los ensayos cíclicos son referidas como curvas histeréticas, debido a la relación que existe entre el desplazamiento, la fuerza y las sollicitaciones a las que fue sometida anteriormente (Guindos, 2019).

Las curvas histeréticas presentan seis fenómenos que caracterizan las uniones de madera (Guindos, 2019). En primer lugar el efecto estrechamiento o pinching, referido al fenómeno de estrechamiento en la zona central de las curvas posterior al primer ciclo de carga. En segundo lugar, la degradación de la rigidez, referido a un decaimiento de la rigidez para deformaciones elevadas. En tercer lugar, la degradación de la capacidad, es decir, la disminución de la oposición de la unión o ensamble al ser sometido al mismo desplazamiento. En cuarto lugar, la envolvente, curva obtenida al unir los picos de fuerza máxima alcanzada en cada ciclo de carga, similar a una curva monotónica. En quinto lugar, la energía potencial disponible, energía transferida, energía disipada y energía elástica, referido a las diversas energías obtenidas a partir de la curva.

Finalmente, Guindos (2019) explica que el fenómeno de amortiguamiento o damping, referido a la energía disipada en una unión o ensamble de madera, producida generalmente por la deformación plástica en uniones, fricción de los conectores, fricciones internas y externas, y también por el calor producido por el aplastamiento de la madera. Esta disipación de energía produce amortiguamiento de la respuesta de un sistema vibratorio, lo que resulta positivo para disminuir la cantidad de energía potencial elástica (sollicitaciones) y energía cinética del sistema estructural.

### 6.2.2 MATRIZ DE ENSAYO

Los 6 modelos de la unión mecanizados con el robot serán las probetas de ensayo de esta etapa. Para ello se considera el ensayo de modelos con y sin reforzamiento, con el objetivo de comparar los resultados y determinar la contribución del refuerzo en términos de capacidad estructural, rigidez y modelos de fallo. La Tabla 1 muestra la matriz de ensayo de los especímenes con y sin refuerzo, donde se consideran diferentes repeticiones de ensayos estáticos y cíclicos.

Modelo	Nomenclatura	Tipo de ensayo	N° de repeticiones
Sin reforzamiento	E1, E2	Estático	2
Sin reforzamiento	E4 al E6	Cíclico	4
Reforzamiento A	E13_RF1	Estático	1
Reforzamiento A	E14_RF1, E15_RF1	Cíclico	2
Reforzamiento B	E16_RF2	Estático	1
Reforzamiento B	E17_RF2, E18_RF2	Cíclico	2

### 6.2.3 CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO

La configuración del ensayo (en inglés test set up) incluye la definición de diferentes aspectos técnicos que son requeridos para realizar los ensayos tales como el equipo a utilizar, la disposición de los modelos, las condiciones de carga y contorno, y la disposición de los instrumentos de medición y adquisición de datos, entre otros. Para definir esta configuración se tomaron como referencia algunas investigaciones como las realizadas por He et al. (2021); Li et al. (2023); Ma et al. (2020); Palma et al. (2012); Xue et al. (2021); Zhang et al. (2022), así como la normativa ISO 16670 (ISO 16670, 2003). No obstante, fue necesario realizar un planteamiento específico para esta tipología de unión, considerando los requerimientos de su configuración y recursos disponibles.

Tab. 19

Matriz de ensayo: modelos de uniones carpinteras con y sin reforzamiento

En específico, el modelo será dispuesto anclado en el suelo de reacción del Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras (LEMCO) y la carga será impuesta a través de un actuador que permiten imponer cargas estáticas de hasta 250 kN, tal como se muestra en la Figura 144. La solera de la unión quedará anclada a partir de dos vigas de perfil tipo H con doble alma, de dimensiones 100x190x190 mm, ancladas desde la parte central de la viga con tornillos al piso. En la parte superior del pie derecho, a 136 cm altura, se utilizará una sujeción metálica, especialmente diseñada y fabricada para este ensayo, que sirve para conectar el pie derecho vertical al brazo actuador que aplicará la carga.

La carga horizontal se aplicará con control de desplazamiento para los ensayos estáticos hasta que se produzca el fallo en la unión. Durante el proceso se deberán registrar los desplazamientos y cargas máximas y últimas experimentadas por la unión. Además, se considera la aplicación de una carga axial pre-comprimda de 20 kN que simula el efecto del peso propio, sobrecarga de uso y la fuerza sísmica a la que está sometida la unión en condiciones de servicio en una estructura real. Para estimar la carga axial se realizaron diferentes procedimientos.

En primer lugar, se consideró la carga estimada por los autores Jiménez & Pelà (2023); Poletti (2013), con un valor entre 20 kN – 25 kN como estimación base para los ensayos. Posteriormente, se realizó un cálculo mediante la norma NCh1198 (2006) para estimar la carga última. Se calcula la tensión de diseño en compresión paralela a partir de los resultados obtenidos previamente en la caracterización mecánica de la madera estructural y patrimonial de Valparaíso. Una vez realizado los cálculos, se obtiene la carga axial última, y de ahí se deduce un 10% de ese valor para realizar el experimento.

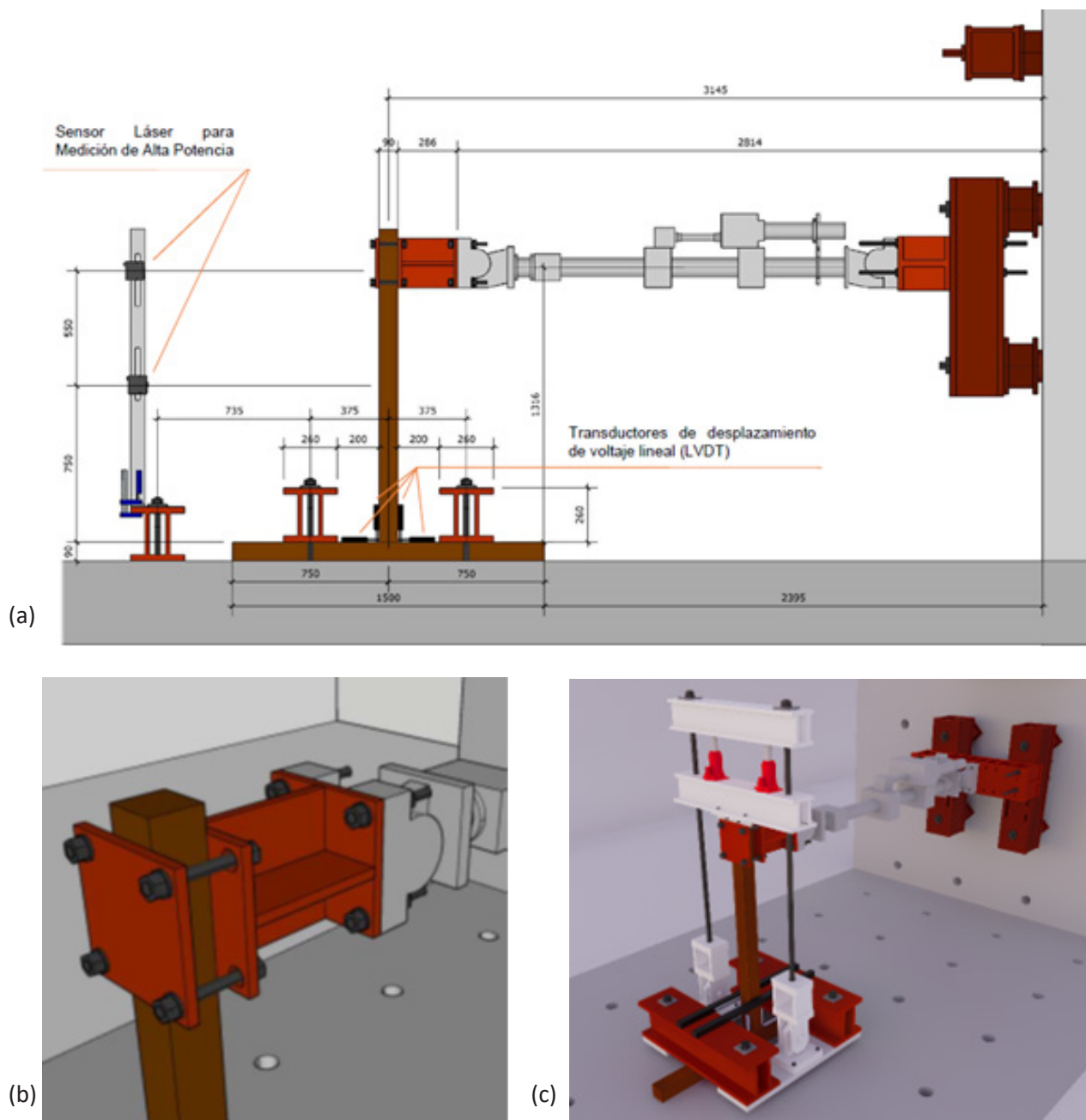


Fig. 144  
 Figura 144. Configuración del ensayo de carga lateral de la unión caja y espiga: (a) elevación lateral con medidas en mm; (b) vista conexión actuador-espécimen; (c) vista general.

El diseño para la aplicación de la carga (Figura 144), se consideró el uso de dos vigas superiores que poseen un sistema de gatas hidráulicas en medio, con el objetivo de generar tracción entre las vigas y, por consiguiente, compresión en la parte superior del pie derecho al actuar ambos elementos. En la parte inferior, las rotulas a ambos lados permiten el movimiento cíclico que se aplicara con el actuador, mientras que las barras horizontales de color negro cerca de la unión tienen como objetivo limitar los movimientos fuera del plano.



LA CASA DEL PUEBLO  
**HOSTAL**

MIAW

YBAR

LA CASA DEL PUEBLO

Plantas Medicina

Materia Prima

Café

Creación

Quesos

Leche

Yogurt

Helados

Postres

Bebidas

Snacks

Artesanías

Romero

Leche

Quesos

Yogurt

Helados

Postres

Bebidas

Snacks

Artesanías

Decoración

### III. CONCLUSIONES

#### RESUMEN DEL TRABAJO

Los inmuebles históricos de entramado de madera de la ciudad de Valparaíso se caracterizan por utilizar métodos tradicionales de anclajes como son las uniones carpinteras, parte del legado constructivo de la ciudad durante su época de apogeo desde finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Las principales uniones carpinteras presentes en estas estructuras corresponden a los ensamble, caja y espiga, cola de milano y embarbillado frontal. El ensamble caja y espiga se caracteriza como la unión más común, observada en los casos de estudio con diversas tipologías según la posición y el rol que cumple dentro del armazón de madera. También se observó en terreno que el ensamble tipo embarbillado frontal, que servía para conectar diagonales y pies derechos, fue reemplazado por una unión más simple y por contacto, anclada a través de clavos.

Los ensambles estudiados cumplen el rol de ser el principal sistema de disipación de energía durante un sismo, convirtiéndose en zonas críticas dentro de la estructura, propensas a sufrir daños mecánicos. A pesar de su valor constructivo, muchos de los edificios históricos que utilizan la técnica de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso están experimentando preocupantes procesos de deterioro, ligados a la poca valoración y el desconocimiento de la cultura constructiva. Aunque existen buenas prácticas que buscan dar valor a estas estructuras mediante la rehabilitación y restauración de los sistemas constructivos, preservando sus características, también se observó una tendencia a desarmar estas estructuras y reemplazarlas por otros sistemas constructivos. Además, el uso de intervenciones de reforzamiento sobredimensionadas debido al desconocimiento del funcionamiento y resistencia del sistema estructural, logrando un aumento innecesario de los costos u alteraciones en la integridad de la estructura.

En los casos estudiados en la sección 4.2. “Estado de conservación: patologías y lesiones características de los marcos y las uniones”, se detectaron principalmente tres factores de riesgo en las estructuras, y que podrían llevar a un deterioro progresivo de las uniones carpinteras. En primer lugar, la presencia de insectos xilófagos o termitas que puede causar la pérdida parcial o total de las piezas de madera debido a la degradación y pérdida de capacidad de la madera. En segundo lugar, la humedad debido a las filtraciones de agua lluvia por falta de mantenimiento de canaletas y techumbre. Este agente patológico genera que las piezas de madera sean vuelvan más propensas a ser atacadas por hongos y termitas, especialmente en las bases de las estructuras, lo que causa la desintegración de las piezas llegando a provocar incluso graves daños estructurales como el asentamiento de las estructuras, generando daños mecánicos en las uniones y la separación de las piezas. Finalmente, el daño mecánico provocado por el efecto acumulativo de los sismos, que produce principalmente la separación de los ensambles, llevando a cabo la pérdida de capacidad de carga y disipación de energía de la unión carpintera.

La problemática inherente a la degradación por daños mecánicos en las estructuras de entramado de madera puede ser mitigada en parte a través del reforzamiento de las estructuras. En particular, en los entramados de madera las uniones son puntos críticos, y afiatar las piezas con sistemas de refuerzo puede ayudar a incrementar la capacidad de carga y de disipación de energía de toda la estructura, especialmente ante cargas sísmicas.

En la literatura el diseño de soluciones de reforzamiento para uniones carpinteras usualmente se abordada a través de aproximaciones experimentales, procesos que, si bien son altamente precisos dado su componente de validación empírico, generalmente, no aplican métodos para el diseño de las soluciones. Esto resulta en la falta de análisis de las necesidades específicas de la unión, incluyendo aspectos arquitectónicos y económicos. Además, la ausencia de aproximaciones al diseño se manifiesta en la replicación de técnicas existentes con pequeñas variaciones, sin una interpretación analítica de las necesidades particulares de cada unión. Considerando lo anterior, esta tesis propuso una metodología para el diseño de soluciones de refuerzo de uniones carpinteras, aplicando métodos cualitativos y semicuantitativos para la resolución de problemas de inventiva y el análisis de las necesidades de cada tipo de unión. Una metodología que se posiciona como un paso previo al despliegue de procesos para la validación experimental de las soluciones, y que pretende ofrecer una fase que integre herramientas para el diseño de productos, en este caso, de soluciones para el reforzamiento de uniones carpinteras.

## METODOLOGÍA PROPUESTA

En términos generales, la metodología busca guiar de manera sistemática el diseño de soluciones de reforzamiento, generando propuestas conceptuales que consideren los principios modernos de la conservación, como los estipulados en la carta de Principios que deben regir la conservación de las estructuras históricas en madera emitida por el ICOMOS (1999). Este documento se considera como la principal guía para establecer los requisitos que debe cumplir la solución de refuerzo. Se plantea el refuerzo como una solución de rehabilitación sostenible, adecuada para evitar la pérdida de la capacidad de la unión y la posible separación de las superficies de contacto, sin comprometer la arquitectura del bien inmueble. De esta manera, se propone una solución técnicamente removible que no dañe en el elemento de madera.

Las herramientas de análisis que integran las nueve etapas de la metodología propuesta permiten conceptualizar los requerimientos del diseño de la solución de reforzamiento, incluyendo la evaluación de aspectos y variables que involucran la función específica de la unión dentro del marco y los requerimientos técnicos y formales que se espera tenga la solución. Estos requerimientos se evalúan en la matriz de la función de calidad, que integra una serie de pasos que permiten ejecutar un análisis global e individual de los requerimientos de la solución. Asimismo, la matriz evidencia posibles contradicciones entre los requerimientos, y sugiere soluciones con la aplicación de la matriz de resolución de problemas de inventiva TRIZ. Este método busca potenciar las características del diseño mediante soluciones innovadoras para la resolución de contradicciones en el diseño de productos, como la descomposición en partes y el uso de materiales compuestos para flexibilizar y reducir el peso de la solución. Finalmente, en las etapas carta morfológica y creación de conceptos, permiten desarrollar de forma conceptual diferentes ideas que responden a las soluciones propuestas por TRIZ.

## RESULTADOS

En este estudio se desarrollaron tres ideas conceptuales que resultaron en dos prototipos finales. Las propuestas de refuerzo “placa compuesta frontal” y “placa compuesta lateral” que derivan de los conceptos “placa frontal compuesta” y “placa lateral compuesto”, respectivamente. Ambas propuestas utilizan solo un material, el acero, pero se configuran con dos elementos diferentes: la placa, que proporciona soporte, resistencia y rigidez, y el cable tensor, que transmite tensiones, proporcionando tracción y flexibilidad. De esta manera, ambas soluciones responden a la sugerencia del método TRIZ. Además, cumplen con el objetivo de no comprometer la arquitectura del bien inmueble gracias a la incorporación de tirafondos con los que se conectan las placas de forma superficial en algunas caras de las piezas de la unión de manera poco invasiva. El uso de placas separadas unidas por un cable tensor permite que ambas sean soluciones técnicamente removibles y con dimensiones moderadas, ya que no cubren toda la sección de los elementos de madera.

La metodología proporciona soluciones que promueven estrategias de intervención mínimas y sostenibles, respetando el valor cultural y estructural asociado a las uniones carpinteras. Los próximos pasos de esta investigación consideran la ejecución de ensayos experimentales para validar la efectividad de las propuestas con el objetivo de determinar cuantitativa y empíricamente si las soluciones permiten mejorar la capacidad de carga de las uniones.

## DISCUSIÓN

La aplicación de un método que compara los objetivos establecidos con soluciones de refuerzo propuestas por otros autores permite analizar las características de cada refuerzo y su adecuación a las necesidades planteadas. Esto facilita que la solución propuesta en esta investigación incorpore, según las necesidades establecidas, elementos de reforzamiento previamente desarrollados. De esta forma, se establece que ambas soluciones de reforzamiento consideran el uso de placas de acero similar a la solución de estribos. A diferencia de estas, las soluciones de refuerzo propuestas, como la “doble placa frontal” y “placa lateral”, utilizan placas separadas con el objetivo de no intervenir el ensamble caja y espiga mediante los tirafondos.

Por otro lado, el uso de cuerdas se asemeja a las soluciones de refuerzo con hilos de aleación con memoria de forma (o shape memory alloy), que se adhieren a los elementos de madera mediante un sistema de abrazadera. Este método permite que la instalación del refuerzo no interfiera en las uniones, manteniendo el sistema completamente reversible. Sin embargo, el uso de abrazaderas dificultaría la instalación in situ debido a la disposición de los elementos de madera en un sistema de entramado de madera en la ciudad de Valparaíso. En cambio, las propuestas de “placa compuesta frontal” y “placa compuesta lateral” emplean un sistema que, aunque interviene en el elemento de madera mediante tirafondos, también permite la reversibilidad de la intervención en el ensamble y ofrece la ventaja de ser instalado en ambos formatos. Además, la solución presentada en esta investigación propone el uso de un solo cable conectado a las placas de acero mediante un sistema de tensor, que permite tensar el cable después de realizar el anclaje.

Si bien las soluciones “doble placa frontal” y “placa lateral” cumplen con los objetivos previamente establecidos para la conservación de estructuras históricas en madera y se analizaron bajo parámetros de carga establecidos por otros autores, no se podrá confirmar el funcionamiento y la resistencia de estas soluciones de refuerzo hasta que se realicen los ensayos experimentales. Es fundamental complementar con la parte experimental para validar los diversos análisis y asegurar que los refuerzos cumplan con la funcionalidad esperada durante un evento sísmico.

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Las conclusiones de esta investigación se resumen en el listado que se presenta a continuación:

- Los entramados de madera son susceptibles al deterioro ocasionado por diversas amenazas, donde se destaca el daño mecánico que se acumula en las uniones debido al efecto acumulativo de los sismos. El daño de las uniones se caracteriza principalmente por la desvinculación de las partes de un componente estructural, que deriva en la pérdida de rigidez y capacidad de disipar energía a nivel local de la unión y global de la estructura.
- La implementación de soluciones de reforzamiento permite mantener la integridad de las uniones carpinteras, permitiendo que estas cumplan con su rol de ser principales sistemas de disipación de energía durante un sismo.
- La adaptación de un método de resolución de problemas de inventiva al contexto patrimonial permite generar soluciones innovadoras para problemáticas anteriormente ya resueltas, enriqueciendo el proceso de conservación y adaptación al patrimonio. No obstante, estas soluciones deben ser sometidas a un análisis experimental, y ajustadas en función de los resultados obtenidos, asegurando su efectividad y viabilidad en condiciones reales.
- Aunque el método resulta extenso y complejo de comprender, su efectividad podría mejorarse mediante la integración de etapas o la implementación de herramientas como software especializado, lo que facilitaría la comprensión y el seguimiento de la continuidad entre cada paso del proceso metodológico.

## PRINCIPALES CONTRIBUCIONES

Esta investigación aporta con las siguientes contribuciones originales:

- Este estudio ofrece un análisis pionero del estado de conservación de ensamblajes estructurales específicos (caja y espiga, embarbillado frontal y cola de milano) en las estructuras de muro de los sistemas constructivos de entramado de madera en Valparaíso, mediante un detallado levantamiento de información de campo. La investigación contribuye al conocimiento del estado actual y a la preservación del patrimonio arquitectónico local.
- Esta tesis adapta una metodología ingenieril de resolución de problemas de inventiva para aplicarla a la conservación patrimonial, enfocándose en el diseño de soluciones de reforzamiento para uniones carpinteras en muros de entramado de madera. La metodología aborda desafíos específicos de estas uniones carpinteras en estructuras patrimoniales de Valparaíso, aportando una perspectiva innovadora en la conservación y mejora de la estabilidad estructural de las edificaciones históricas.
- Se aplica la metodología sistemática para el desarrollo de conceptos preliminares y el diseño detallado de soluciones de refuerzo para los ensambles patrimoniales específicos en muros de entramado de madera. Esto culmina en la construcción de dos soluciones innovadoras, basadas en una estructura de placa con cable tensor, que pueden ser adaptadas para muros a la vista o con revestimiento, ofreciendo una alternativa práctica y versátil para la conservación de estructuras históricas.
- Se define un set-up experimental específico para futuros ensayos en el ensamble caja y espiga, con el fin de evaluar su comportamiento estructural tanto con como sin la solución de refuerzo. Este diseño experimental ofrece una base metodológica para futuras investigaciones, permitiendo una validación sistemática de las soluciones de refuerzo en el contexto de conservación de estructuras patrimoniales.

## TRABAJO FUTURO

Esta tesis termina con las siguientes sugerencias para futuras líneas de investigación que se desprenden del trabajo realizado:

### **Metodología para el diseño de soluciones de reforzamiento y alcances de la aplicación**

- Integrar a la metodología propuesta una fase de estudio de los materiales y elementos comerciales con los que se tenga disponibilidad, considerando propiedades mecánicas, formatos y distribución, de forma previa a la definición de los conceptos, con el objetivo de proponer ideas más allá de lo conceptual que sean ejecutables.
- Continuar la fase de prototipado y construcción de las soluciones de reforzamiento para las tipologías de uniones carpinteras embarbillado frontal y cola de milano. Incluir incluso otros tipos de uniones y sistemas constructivos que puedan estar presentes en el territorio nacional.
- Incluir en la metodología la evaluación de otros agentes del deterioro de las uniones y/o amenazas.
- Aplicar la metodología en otros contextos, por ejemplo, para evaluar el reforzamiento de otros elementos estructurales, tales como refuerzos de vigas, e incluso de otros sistemas constructivos: acero, hormigón o albañilería de ladrillo no reforzado.

### **Desarrollo de estudios avanzados: validación experimental y análisis numéricos**

- Concluir con la validación experimental de las uniones carpinteras a través de ensayos de carga lateral, incluyendo la valoración de otros aspectos y parámetros de las soluciones, tales como la tensión de los cables, el número de sujeciones o tirafondos, la materialidad, etc.
- Con la información experimental, trabajar en el desarrollo de modelos numéricos que permitan crear laboratorios virtuales donde evaluar el diseño y prototipado de soluciones de reforzamiento, predecir sus comportamientos y mejorar los resultados previo a la construcción de estos.

### **Aplicación a un caso real**

- Luego de verificadas las soluciones de reforzamiento, depurar el diseño y aplicar el refuerzo a un edificio histórico que requiera la aplicación de los refuerzos.
- Monitorear el desempeño del reforzamiento en función a lo largo del tiempo, y aplicar mejoras de acuerdo con lo observado.





X 1810 X

A LA CIUDAD DE VALPARAISO  
LA COLONIA BRITANICA

X 1910 X



411710

## IV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Abolmaali, A., Treadway, J., Aswath, P., Lu, F. K., & McCarthy, E.** (2006). Hysteresis behavior of t-stub connections with superelastic shape memory fasteners. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(8), 831–838. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.11.017>

**Altshuller, G.** (2002). 40 principles, TRIZ Keys to Technical Innovation (third, Vol. 1). Technical Innovation Center, Inc.

**Ames, W. C.** (2008). TRIZ, la herramienta del pensamiento e innovación sistemática. *Contabilidad y Negocios*, 3(6). <https://doi.org/10.18800/contabilidad.200802.004>

**Arana, A.** (2019). Castillo de Cifuentes. Análisis y estado de conservación.

**Aranha, C., & Branco, J.** (2021). Seismic reinforcement of traditional timber structures.

**Arriaga, F., Iñiguez, G., Herrero, M., Álvarez, R., & Fernández, J.** (2011). Diseño y cálculo de uniones en estructuras de madera (MADERIA, Vol. 1).

**Arriaga, F., Peraza, F., Herrero, M., Bobadilla, I., & García, F.** (2002). Intervención en estructuras de madera (Vol. 1).

**Asimow, M.** (1962). An introduction to design (First Edition, Vol. 1). Prentice-Hall, Inc.

**Aslankaya, G.** (2019). Influence of joints on the seismic response of traditional timber frames in Turkey. <http://www.tdx.cat/?locale->

**Association, A.** (2001). Details for Conventional Wood Frame Construction. 17.

**Barreiro, S., & Hirsch, T.** (2011). Protección de la madera. 1–60.

**Barrientos, M.** (2016). La arquitectura de los terremotos en Chile (1929-1972) [Tesis de doctorado en arquitectura y estudios urbanos]. Pontificia Universidad Católica de Chile.

**Barros, L., & Sarabia, G.** (2016). Sistemas constructivos básicos (H. González, Ed.; Editorial USM, Vol. 1).

**Berk, J., & Berk, S.** (2000). Quality Function Deployment: Understanding and satisfying customer expectations... Quality Management for the Technology Sector, 124–134. <https://doi.org/10.1016/B978-075067316-7/50012-7>

**Branco, J. M., & Descamps, T.** (2015). Analysis and strengthening of carpentry joints. Construction and Building Materials, 97, 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.089>

**Broto, C.** (2006). Enciclopedia Broto de patologías de la construcción.

**Brunskill, R. W.** (1976). Vernacular Architecture of the Northern Pennines: A Preliminary View. Northern History, 11(1), 107–142. <https://doi.org/10.1179/nhi.1976.11.1.107>

**Burn, R.** (1873). Building Construction.

**Bustos, P.** (2023). Patologías constructivas en Valparaíso [Tesis]. Universidad Técnica Federico Santa María.

**Buzón, R.** (1982). Rehabilitación y reforma estructural de edificios antiguos. 33(338), 33–46. <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>

**Cardone, D., Angiuli, R., & Gesualdi, G.** (2019). Developing Solutions Based on Shape Memory Alloys for Historical Constructions. In RILEM Bookseries (Vol. 18, pp. 379–387). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_40)

**Carrasco, C., Alvial, C., Eujenio, N., & Rojas, S.** (2018). Uso, Desuso y la Caracterización de la Dimesión Intermedia como un Potencial de REhabilitación. Tres Escalas de Aproximación, Análisis y Diagnóstico para el caso de Valparaíso, Chile. ARQUITECTURAS DEL SUR, 36(54), 32–45. <https://doi.org/10.22320/07196466.2018.36.054>

**Carrión, F., Hernández, J., & Terán, J.** (2005). Estudio experimental de un puente atirantado, evaluación de cables.

**Cascajares, M., & Crespo, I.** (2015). Tecnología constructiva de las cabañas de madera (log-houses) en las Laurentides (Quebec, Canadá).

**Castillo, S., & Waldo, C.** (2019). Los ascensores de Valparaíso: movilidad, transporte público y desarrollo urbano (1880-1930). Revista 180, 43, 87–100.

**Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., & Sousa, H. S.** (2016). A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. In Construction

and Building Materials (Vol. 114, pp. 681–687). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.001>

**Chácara, C.** (2013). Evaluación estructural de construcciones históricas en la costa peruana utilizando tecnologías modernas: El caso del Hotel “El comercio” en Lima [Tesis de grado]. Pontificia Universidad Católica del Perú.

**Chaur, J.** (2004). Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña]. <http://hdl.handle.net/2117/94147>

**Chen, C., Qiu, H., & Lu, Y.** (2016a). Flexural behaviour of timber dovetail mortise-tenon joints. *Construction and Building Materials*, 112, 366–377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.074>

**Chen, C., Qiu, H., & Lu, Y.** (2016b). Flexural behaviour of timber dovetail mortise-tenon joints. *Construction and Building Materials*, 112, 366–377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.074>

**Cherubini, G.** (2019). La escuela de carpinteros alemanes de Puerto Montt, su formación e influencia más allá de las fronteras (L. Berg, Ed.; Segunda edición, Vol. 1). Universitaria.

**CMN.** (2004). Postulación de Valparaíso como Sitio de Patrimonio Mundial, UNESCO (1st ed., Vol. 70). Cuadernos del Consejo de Monumentos Nacionales.

**Condom, L.** (2014). Características generales y evolución de las estructuras de madera y los medios de unión.

**CORMA, C. de transferencia T.** (2008). Capítulo 1 Consideraciones Generales. Unidad 2: Patologías y protección de la madera en servicio. In *Manual. La construcción de Viviendas en Madera*.

**Cortés, L.** (2002). Plataforma experimental para la simulación de la carpintería de armar robotizada. Universidad Técnica Federico Santa María.

**Cuadrado, J., castañeda, H., Cuellar, F., & Flores, M.** (2017). Durabilidad natural de la madera de *Pinus oocarpa* y *Pinus tecunumanii*, proveniente de plantaciones forestales en San Alberto, Oxapampa. *Revista Forestal Del Perú*, 32(2), 70–77.

**Dai, B., Gao, Y., Tao, Z., Su, H., & Su, H.** (2022). Fan-shaped Shear Dampers Strengthen Mortise-tenon Joints in Chinese Traditional Timber Structures. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.2011476>

**Dávila, V., & Contreras, J.** (2022). El adobillo cultura constructiva de Valparaíso (2nd ed., Vol. 1). Ministerio de las culturas, las artes y el patrimonio.

**De la Cruz, R., Carrillo, A., Nájera, J., Cruz, F., Hernández, F., & Méndez Jorge.** (2018). Durabilidad natural de la madera de siete especies forestales

de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 102–130. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.144>

**Dhandapany, D., & Menon, A.** (2019). Seismic Behavior of Timber-Laced Masonry Structures in the Himalayan Belt (pp. 605–613). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_65)

**Doğangün, A., Tuluk, Ö. I., Livaoğlu, R., & Acar, R.** (2006). Traditional wooden buildings and their damages during earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 13(6), 981–996. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.04.011>

**Dolce, M., & Cardone, D.** (2001). Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(11), 2657–2677. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00050-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00050-9)

**Dym, C., & Little, P.** (2002). *El proceso de diseño en ingeniería. Cómo desarrollar soluciones efectivas*. Limusa, Wiley.

**Elizondo, C.** (2015). *Diseño de un dispositivo de soporte para una cámara de filmación aérea en un helicóptero AS350 [Memoria de titulación]*. Universidad Técnica Federico Santa María.

**EN 12512:2001/A1.** (2005). *Timber Structures - Test methods - Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners*.

**Feio, A. O., Lourenço, P. B., & Machado, J. S.** (2014). Testing and modeling of a traditional timber mortise and tenon joint. *Materials and Structures*, 47(1), 213–225. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0056-y>

**FSC España.** (2018). *En Madera, otra forma de construir El material constructivo sostenible del siglo XXI FSC ® F000228*. [www.es.fsc.org](http://www.es.fsc.org)

**Fuezalida, P.** (2015). *Morfología, usos e impactos en los espacios públicos turísticos de la ciudad. El caso de los barrios Lastarria y Yungay en Santiago y del cerro Concepción en Valparaíso*. Universitat de Barcelona.

**García, M.** (2016). *Madera laminada, El material del siglo XXI [Trabajo fin de grado]*. Universidad Politécnica de Madrid.

**Garreaud.** (1870). *Panorámica de Valparaíso*.

**Garzón, L.** (2011). “Técnicas mixtas” En: Neves, C y Faria, O. *Técnicas de construcción con tierra*. Bauru-SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 62–71.

**Gentile, C., Svecova, D., Rizkalla, S. H., & Asce, F.** (2002). Vigas de madera reforzadas con barras de PRFV: Desarrollo y aplicaciones. *J. Compos. Constr.*, 6, 11–20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE))

**Gill, D.** (2017). Sistemas constructivos de madera en viviendas de Playa Ancha de principios del siglo XX [Memoria de título]. Universidad Técnica Federico Santa María.

**Gilliss, J.** (1855). The U.S. Naval Astronomical Expedition to the Southern Hemisphere during the Years 1849-50-51-52. (Vol. 1).

**González, A.** (2013). Comportamiento estructural de conexiones semirrígidas en marcos sismorresistentes de madera laminada (ductilidad local). Universidad de Costa Rica.

**González, L., & Maino, S.** (2019). Uniones carpinteras de Valparaíso. La geometría de ensambles y empalmes (RIL, editores, Vol. 1).

**González, L., Quital, F., Maino, S., & Hurtado, M.** (2017). Reconstrucción robotizada del patrimonio arquitectónico chileno em madera. 236-241. <https://doi.org/10.5151/sigradi2017-038>

**González, R.** (2008). Vivir entre la Obsolescencia y la Renovación Urbana. El caso de la Zona Típica de Valparaíso [Tesis de Magister]. Pontificia Universidad Católica de Chile.

**Grant, H.** (1900). Paseo Atkinson.

**Guindos, P.** (2019). Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte I uniones, refuerzos, elementos compuestos y diseño antisísmico (Ediciones UC, Vol. 1).

**Hardy, J.** (1906). Vistas del terremoto: 16 de agosto de 1906. Valparaíso. In Valparaíso: Universo. <https://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-99134.html>

**Harris, G.** (1996). Emigración y políticas gubernamentales en Chile durante el siglo XIX, Valparaíso, (1st ed., Vol. 1). Edición Universitarias de Valparaíso.

**He, J., Yu, P., Wang, J., Yang, Q., Han, M., & Xie, L.** (2021). Theoretical model of bending moment for the penetrated mortise-tenon joint involving gaps in traditional timber structure. *Journal of Building Engineering*, 42, 103102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103102>

**Hernández, S.** (2019). Degradación y durabilidad de materiales y componenetes constructivos. (Vol. 1). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura.

**Hidalgo, R., Vergara, C., & González, M.** (2022). Las condiciones de la urbanización y la producción de naturaleza en ciudades litorales chilenas. Los casos de Valparaíso y Coquimbo. *EURE*, 45(145), 1-24.

**Huang, H., & Chang, W.** (2016). A Novel Timber Dowel-Type Connection Using Shape Memory Alloy. <https://www.researchgate.net/publication/307139424>

**ICOMOS.** (1999). Principios que deben regir la conservación de las estructuras históricas en madera (1999).

**Inat, S.** (2011). Sistema de plataforma con entramado ligero de madera, puesta en obra y aceptación en España. Universidad Politécnica de Catalunya.

**ISO 16670.** (2003). Timber structures-Joints made with mechanical fasteners-Quasi-static reversed-cyclic test method.

**Jiménez, B.** (2020). Seismic vulnerability assessment of traditional timber frame and masonry wall buildings. Application to the historical centre of Valparaíso, Chile. [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de Catalunya, UPC BarcelonaTech.

**Jiménez, B., & Pelà, L.** (2023). Numerical Modelling of Traditional Buildings Composed of Timber Frames and Masonry Walls under Seismic Loading. *International Journal of Architectural Heritage*, 17(8), 1256–1289. <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2033885>

**Jiménez, M.** (2014). Los Entramado Tradicionales de Madera en los Cerros Alegre y Concepción [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica Federico Santa María.

**Jimeno, I.** (2015). Rehabilitación de Edificios con Estructuras de Madera: Una Primera Aproximación a la Diagnóstico. [Proyecto Fin de Grado]. E.T.S. Arquitectura (UPM).

**Jones, J.** (1970). Design Methods: seeds and human futures.

**Jorquera, N.** (2014). Culturas constructivas que conforman el patrimonio chileno construido en tierra. *AUS*, 16, 30–35. <https://doi.org/10.4206/aus.2014.n16-06>

**Jorquera, N.** (2014). Culturas sísmicas: estrategias vernaculares de sismorresistencia del patrimonio arquitectónico chileno. *Arquitecturas Del Sur*, 32(46), 18–29. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/AS/article/view/739>

**Jorquera, N.** (2022). Patrimonio Chileno Construido en Tierra (ARQ ediciones, Vol. 1).

**Julián, F., Espinach, X., Verdaguer, N., & Tresserras, J.** (2002). Metodología del diseño, historia y nuevas tendencias.

**Kapstein, P.** (2018). Regeneración de Esqueletos Urbanos en Valparaíso: Patrimonio, Espacio Público y Memoria Colectiva. <https://eventos.unizar.es/go/isufh2018>

**Kiran, D. R.** (2017). Quality Function Deployment. *Total, Quality Management*, 425–437. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811035-5.00030-1>

**Larraín, L.** (2015). Caracterización numérica de propiedades mecánicas de espumas de cobre reforzadas con partículas de segunda fase [Memoria de titulación]. Universidad Técnica Federico Santa María.

**Lasheras, F.** (2001). Patología de la madera. Tratado de Rehabilitación (Vol. 3).

**Lasheras, F.** (2009). Patología de la construcción con madera. In T. Reuters & S. A. Aranzadi (Eds.), Tratado Técnico Jurídico de la Edificación y el Urbanismo (Vol. 1, pp. 789–850). <http://es.wikipedia.org/wiki/Madera>.

**Leblanc.** (1890). Calle Blanco de Valparaíso hacia el Almendral. <https://www.bibliotecanacionaldigital.gob.cl/bnd/632/w3-article-315811.html>

**Leser, H.** (1990). Revista de Arquitectura UCH. El Sistema Constructivo Ballon-Frame, 11, 16–19.

**Lewis, M.** (2014). Australian Building a Cultural Investigation. <https://www.mileslewis.net/australian-building/>

**Li, H., Qiu, H., & Wang, W.** (2021). Experimental study on the mechanical performance of mortise-tenon joints reinforced with replaceable flat-steel jackets. *Journal of Renewable Materials*, 9(6), 1111–1125. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.014722>

**Li, S., Li, D., Chen, T., Milani, G., Shi, S., & Wang, S.** (2023). Seismic performance of timber through-tenon joints with shrinkage flaw in tenon. *Journal of Building Engineering*, 65, 105702. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105702>

**Liotta, G.** (2000). Los Insectos y sus Daños en la Madera. Problemas de Restauración. (Nerea, Vol. 1).

**Ma, L., Xue, J., Dai, W., Zhang, X., & Zhao, X.** (2020). Moment-rotation relationship of mortise-through-tenon connections in historic timber structures. *Construction and Building Materials*, 232, 117285. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117285>

**Manetti, J.** (2020). Evaluación del desempeño sísmico de estructuras de madera frente a réplicas [Grado de magister]. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería.

**MINVU.** (2017). Construcción en Quincha liviana. Sistemas constructivos sustentables de reinterpretación patrimonial.

**MINVU.** (2018). Recomendaciones para la prevención y control de ataques de termitas en edificaciones.

**Monjo, J.** (1999). La patología y los estudios patológicos. Tratado de Rehabilitación. . Metodología de La Restauración y de La Rehabilitación, 2, 105–124.

**Museo Histórico Nacional.** (1855). Ascensor Concepción. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Ascensor-Concepcion-c-1885-Fuente-Museo-Historico-Nacional\\_fig3\\_335478698](https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Ascensor-Concepcion-c-1885-Fuente-Museo-Historico-Nacional_fig3_335478698)

**NCh1198.** (2006). Madera -Construcciones en madera - cálculo.

**Norma UNE-ENV.** (1997). EUROCÓDIGOS, Norma Europea experimental EUROCÓDIGO 5.

**Obrien, M.** (2010). Hybrids on the Way to the Western Platform Frame: Two Structures in Western Virginia. Preservation, Education and Research (Vol. 3).

**Pahl, G., & Beitz, W.** (2007). Engineering design (K. Wallace & L. Blessing, Eds.; 3rd ed., Vol. 1). Springer-Verlag.

**Palma, P., Ferreira, J., & Cruz, H.** (2010). Monotonic test of structural carpentry joints.

**Palma, P., Garcia, H., Ferreira, J., Appleton, J., & Cruz, H.** (2012). Behaviour and repair of carpentry connections – Rotational behaviour of the rafter and tie beam connection in timber roof structures. Journal of Cultural Heritage, 13(3, Supplement), S64–S73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.03.002>

**Parisi, M., & Piazza, M.** (2000). Mechanics of plain and retrofitted traditional timber connections.

**Parisi, M., & Piazza, M.** (2008). Seismic strengthening of traditional carpentry joints.

**Peraza, J., Arriaga, F., Arriaga, C., González, M., Peraza, F., & Rodríguez, M.** (1995). Casas de Madera (ATIM).

**Plásticos brelo, S. A.** (2018). ABS GF – Acrilonitrilo butadieno estireno recubierto con fibra de vidrio. <https://Plasticos-Brello.Com/Material/Abs-Gf/>.

**Poblete, D.** (2017). Prototipo de puente peatonal de madera ensamblada con uniones carpinteras mecanizadas por un robot manipulador [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico santa María]. <http://hdl.handle.net/11673/24040>

**Poletti, E.** (2013). Characterization of the seismic behaviour of traditional timber frame walls [Tese de doutoramento]. Universidade do Minho.

**Poletti, E., Vasconcelos, G., Branco, J. M., & Koukouviki, A. M.** (2015). Mechanical characterization of traditional timber connections: experimental results. Mecânica Experimental, 25, 43–54.

**Prain, M.** (2007). Presencia Británica en el Valparaíso del siglo XIX: Una aproximación al legado institucional y cultural de la colonia británica en Chile. Bicentenario. Revista de Historia de Chile y America, 6(2), 5–38.

**Pugh, S.** (1991). Total, Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering (Addison-Wesley Pb, Vol. 1).

**Qu, Z., Dutu, A., Zhong, J., & Sun, J.** (2015). Seismic Damage to Masonry-Infilled Timber Houses in the 2013 M7.0 Lushan, China, Earthquake. Earthquake Spectra, 31(3), 1859–1874. <https://doi.org/10.1193/012914EQS023T>

**Quitral, F., González, L., García, R., & Martínez, A.** (2020). Workflow for a Timber Joinery Robotics.

**Ripa, R., Autores, P. L., Luppichini, P., Krecek, J., Lenz, M., & Creffield, J. W.** (2004). Termitas y otros insectos Xilófagos en Chile: Especies, Biología y Manejo. (R. Ripa & Paola Luppichini, Eds.; 11th ed., Vol. 1). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA.

**Rojas, E.** (1999). Préstamos para la conservación del patrimonio histórico urbano: Desafíos y oportunidades. <https://www.researchgate.net/publication/254421893>

**Rosas, J.** (2017). Diseño mecánico de prototipo funcional de banco de baterías para automóvil eléctrico liviano [Memoria de titulación]. Universidad Técnica Federico Santa María.

**Ruiz, C.** (1996). Concentración de población y desarrollo económico - El caso chileno (Vol. 89). Universidad de Chile.

**Saaty, T. L.** (1990). An exposition of the AHP in reply to the paper "Remarks on the analytic hierarchy process." Management Science, 36(3), 259–268. <https://doi.org/10.1287/mnsc.36.3.259>

**Sánchez, A., & Díaz, S.** (2017). La madera como soporte de los bienes culturales: estudio técnico-material, aproximación a su identificación y factores de deterioro. Universidad de La Laguna.

**Sánchez, A., & Jiménez, C.** (2011). Valparaíso: La ciudad-puerto más importante de Chile y la vulnerabilidad de su patrimonio arquitectónico a los riesgos sísmicos. In Estudios Geográficos (Vol. 72, Issue 271). <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201122>

**Schmidt, R. J., & Mackay, R.** (1997). Timber Frame Tension Joinery.

**Shiratori, T., Komatsu, K., & Leijten, A.** (2008). Modified traditional Japanese timber joint system with retrofitting abilities. In Structural Control and Health Monitoring (Vol. 15, Issue 7, pp. 1036–1056). <https://doi.org/10.1002/stc.240>

**Silva, R.** (2018). Desempeño sísmico de muros de quincha tradicional mediante el método del espectro de capacidad [Tesis]. católica Pontificia universidad del Perú.

**Steinmeyer, D.** (2015). Diseño de equipo de enrollamiento de cintas transportadoras para la industria minera.

**Tamayo, E., & Bosch, V.** (2004). ¿Qué es el QFD? Descifrando el Despliegue de la Función de Calidad. [www.qfdlat.com](http://www.qfdlat.com)

**Tannert, T.** (2016). Improved performance of reinforced rounded dovetail joints. *Construction and Building Materials*, 118, 262–267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.038>

**Tannert, T., & Lam, F.** (2009). Self-tapping screws as reinforcement for rounded dovetail connections. In *Structural Control and Health Monitoring* (Vol. 16, Issue 3, pp. 374–384). <https://doi.org/10.1002/stc.283>

**Tomasi, J., & Bellmann, L.** (2018). diseño y construcción con tierra biorquitectura. *Estructura*, 1, 28–34. <http://hdl.handle.net/11336/177972>

**Tornero, R.** (1872). Casas en el cerro Alegre. In *Chile Ilustrado* (p. 120).

**Torrealva, D., Vicente, E., Michiels, T., Greco, F., Cancino, C., & Wong, K.** (2018). Seismic retrofitting project: testing of materials and building components of historic adobe buildings in Peru.

**Torroja, E.** (2010). Razón y ser de los tipos estructurales (Vol. 1). Ediciones Doce Calles.

**Treutler, P.** (1851). Puerto de Valparaíso, hacia 1851. In *Memoria Chilena*. <https://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-68017.html>

**UNESCO.** (1972). Convencion sobre la proteccion del patrimonio mundial, cultural y natural. <https://whc.unesco.org/archive/convention-es.pdf>

**Urbán, P.** (1996). Apuntes de construcción II-III. II Estructuras de madera (Vol. 1). Editorial Club Universitario.

**Urbán, P.** (2012). Construcción de estructuras de madera (Club universitario, Vol. 1).

**Vergara, C., & Casellas, A.** (2016). Vergara-Constela, C., Casellas, A. 2016. “Políticas estatales y transformación urbana ¿Hacia un proceso de gentrificación en Valparaíso Chile? *EURE. Revista de Estudios Urbanos Regionales*, 42 p.123-144. *EURE. Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*, 42, 123–144. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612016000200006>

**Vick, C.** (1999). Adhesive bonding of wood materials. In colectivo de autores, *Wood handbook - Wood as an engineering material*.

**Waisberg, M.** (1998). Casas de Playa Ancha. La vivienda de fines del siglo XIX en Valparaíso (2nd ed., Vol. 1). Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico.

**Wu, G., Gong, M., Gong, Y., Ren, H., & Zhong, Y.** (2019). Mechanical performance of mortise and tenon joints pre-reinforced with slot-in bamboo scrimber plates. *Journal of Wood Science*, 65(1). <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1816-2>

Xie, Q., Zhang, L., Zhou, W., Wang, L., & Zhou, T. (2019). Cyclical behavior of timber mortise-tenon joints strengthened with shape memory alloy: experiments and moment-rotation model. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(8), 1209–1222. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1501116>

**Xue, J., Wu, C., Zhang, X., & Qi, Z.** (2021). Experimental and numerical study of mortise-tenon joints reinforced with innovative friction damper. *Engineering Structures*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111701>

**Xue, J., Wu, C., Zhang, X., & Zhang, Y.** (2020). Experimental study on seismic behavior of mortise-tenon joints reinforced with shape memory alloy. *Engineering Structures*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110839>

**Yu, S., Pan, W., Su, H., Ye, L., & Wang, D.** (2022). Experimental Study on Tenon and Mortise Joints of Wood-Structure Houses Reinforced by Innovative Metal Dampers. *Forests*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/f13081177>

**Zhang, B., Xie, Q., Li, S., Zhang, L., & Wu, Y.** (2022). Effects of gaps on the rotational performance of traditional straight mortise-tenon joints. *Engineering Structures*, 260, 114231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114231>

**Zhao, X. bi, Zhang, F. liang, Xue, J. yang, & Ma, L. lin.** (2019). Shaking table tests on seismic behavior of ancient timber structure reinforced with CFRP sheet. *Engineering Structures*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109405>

**Zhou, Q., & Yan, W.** (2015). Aseismic behaviors of ancient Chinese structures strengthened by different methods. *Studies in Conservation*, 60(6), 384–392. <https://doi.org/10.1179/2047058414Y.0000000137>



## V. ANEXOS

### ANEXO 1

La tabla 21 resume las características claves de cada especie de xilófago presente en Chile, detallando y comparando aspectos como la forma y el tamaño de las diferentes especies, el lugar de la ovipostura, diferenciando si ocurre en grietas, poros o en las galerías, y el tamaño de los agujeros que los coleópteros en estado adulto perforan en la madera al salir de ella para terminar su ciclo en otro lugar.

Dentro de la familia Anobiidae, se encuentran los conocidos “Escarabajos de muebles”, presentes en Chile desde la V hasta la X región (Artiagas, 1994). Ripa et al. (2004) explica que esta especie de xilófago se caracteriza por atacar prácticamente todos los tipos de madera en servicio y por dejar orificios de salida con un diámetro de 1 a 2 mm, como se muestra en la Figura 145a y Figura 145b. Por otro lado, en la familia Lyctidae destaca el “coleóptero pulverizador de la madera” o *Lyctus chilensis*, presentes en Chile desde la V hasta la X región. Se caracteriza por crear orificios de salida con un diámetro de 2 mm, como se observa en la Figura 145c, y tiene preferencia por maderas duras y secas como el aramo, roble, eucalipto, entre otras. Además, genera daño cuya intensidad está fuertemente relacionada con el tiempo transcurrido desde la infestación.

**Tab. 20**  
Clasificación de las principales familias de coleópteros xilófagos que atacan madera en servicio en Chile. Basada en (Ripa et al., 2004)

Familia	Madera en Servicio	Arboles enfermos y/o muertos	Madera Seca envejecida
<b>Anobiidae</b>	<b>x</b>		
<b>Luctidae</b>	<b>x</b>		<b>x</b>
<b>Bostrichidae</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
<b>Curculionidae</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
<b>Cerambycidae</b>		<b>x</b>	<b>x</b>
<b>Scoltydae</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	

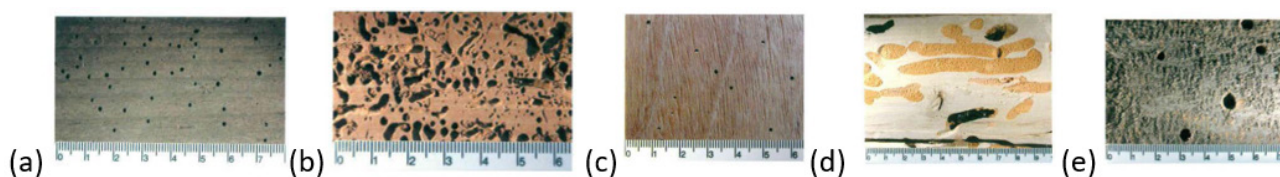
Característica	Anobiidae	Lyctidae	Bostrichidae	Curculionidae
Dibujo				
Ubicación en Chile	Desde la V a la X región	Desde la V a la X región	Desde la IV a la X región	Desde la II a la X región
Tamaño del insecto (mm)	3 a 6	2 a 7	3 a 20	3 a 5
Forma del insecto	Cilíndrica	Aplanada	Cilíndrica	Cilíndrica, cabeza aguzada
Lugar ovipostura	Grietas	Grietas y poros	Galerías	Galerías
Diámetro de orificio de salida (mm)	1 a 2	2	3 a 5	1

Ripa et al. (2004) establecen que, en Chile, dentro de la familia de Bostrichidae, destacan dos especies. La primera el “Taladro de Vis”, localizado desde la IV a la VIII región, caracterizada por dañar principalmente muebles fabricados con caña y coligue. En segundo lugar, se encuentra la especie “Taladrador grande de la madera” o *Polycaon chilensis*, frecuentemente presentes desde la IV a la X región. Esta especie daña la madera seca, reduciendo sus propiedades mecánicas y, posteriormente, provocando el colapso de las estructuras de madera. No obstante, Ripa et al. (2004) explican que el daño no es evidente, ya que esta especie no produce aserrín, por lo que no se detecta la infestación hasta que aparecen los primeros orificios debido a la emergencia de los xilófagos adultos de la colonia, los cuales tienen un diámetro de 3 a 5 mm, como se observa en la Figura 145d y Figura 145e.

Tab. 21  
Resumen características principales familias coleópteros xilófagos presentes en las maderas en servicio Chile. Basada en (Ripa et al., 2004)

Finalmente, Ripa et al. (2004) explican que a nivel mundial existen alrededor de cuarenta mil especies de la familia de xilófagos Curculionidae. Saez (2002) añade que las especies comúnmente conocidas como gorgojos son las que suelen atacar la madera. Krammer (1997) sostiene que, en general, estos gorgojos no causan un daño significativo a la madera en servicio, ya que tienen preferencia por maderas con un grado de descomposición. Ripa et al. (2004) mencionan que, dentro de esta familia, la especie *Pentarthrum* se encuentra distribuida desde la II a la X región. Estos coleópteros se caracterizan por dañar maderas con un alto porcentaje de humedad y en estado de deterioro, especialmente cuando ya han sido atacadas por hongos. Aunque los ataques comienzan en maderas en mal estado, rara vez se extienden a madera en buen estado, incluso cuando están yuxtapuestas.

Fig. 145  
(a) Daño *Anobium punctatum*; (b) corte en madera dañada por *Anobium punctatum*; (c) daño de *Lyctus chilensis* en madera enchapada en coligüe; (d) daño de la larva de *Polycaon chilensis*; (e) Orificio de salida de adultos de *Polycaon chilensis*. (Ripa et al., 2004).



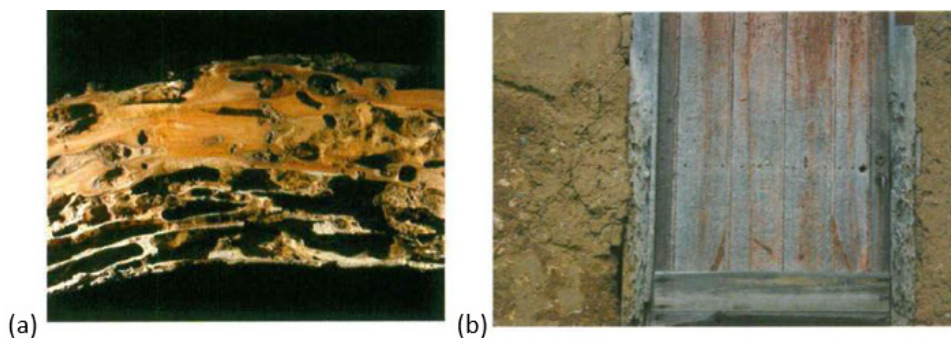
## ANEXO 2

Las termitas que infestan la madera seca, como afirma Ripa et al. (2004) tiene la capacidad de sobrevivir en condiciones de baja humedad y construir sus nidos en el mismo lugar donde se encuentra su fuente de alimento. Entre estas, se encuentran los *Cryptotermes brevis* y *Neotermes chilensis*. Ripa et al. (2004) explican la categorización existente entre las termitas basadas en hábitos alimenticios y sus hábitos de nidificación, reconociendo a las termitas de madera húmeda, termitas de madera seca y subterráneas. La especie conocida como “termita de muebles” o *Cryptotermes brevis* según dice (Artigas, 1994) se distribuye desde la I a la V región con infestaciones más comunes en las zonas costeras. Según Peters (1996), esta es una de las especies más destructivas a nivel mundial.

Por otra parte, la termita de madera seca, también conocida como termita chilena de nombre científico *Neotermes chilensis*, es una especie nativa de Chile que se encuentra desde la III a la V región (Artigas 1994). Ripa et al. (2004) explican que estas termitas se establecen en el interior de la madera, creando galerías que forman amplios espacios. Esta especie se caracteriza por colonizar edificaciones con una antigüedad superior a 10 años, afectando elementos como vigas, aleros, puertas, marcos, entre otros. Además, atacan diversas especies de madera, como pino radiata, álamo, roble, entre otras. El daño que causan es generalmente lento, requiriendo varios años para provocar un deterioro significativo (Figura 146a). Este daño es detectable debido a la acumulación de excrementos expulsados desde las galerías hacia el exterior, como se observa en la Figura 146b. El daño acumulativo si no es manejado puede volverse evidente desde el exterior.

Fig. 146

Fotografías: (a) daño de *N. chilensis* en molle; (b) daño de *N. chilensis* en puerta, la Dormida, V Región. (Ripa et al., 2004).



La Termita de madera húmeda, también conocida como *Porotermes quadricollis*, se distribuye desde la V a la XI región en Chile según Artigas (1994). Esta especie infesta maderas con un alto porcentaje de humedad y establece sus colonias en el interior de la madera, sin necesidad de estar en contacto con el suelo. Como explica Ripa et al. (2004), las termitas de madera húmeda se encuentran en tocones, árboles muertos, maderas afectadas por hongos y húmedas (Figura 147). Las infestaciones ocurren principalmente cuando la madera está en contacto con el suelo o en áreas húmedas debido a filtraciones. Estas termitas se caracterizan por crear galerías de mayor tamaño, consumiendo la madera y expulsando una gran cantidad de excremento al exterior. A pesar de esto, como señala Ripa et al. (2004), el daño no es visible, excepto cuando las paredes de la madera colapsan, dejando expuestas las



Fig. 147

Fotografías: Tocón de pino insigne (*Pinus radiata*) en plantación, Purén, IX región. (Ripa et al., 2004).



(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 148

Fotografías: (a) viga dañada por *Reticulitermes flavipes*; (b) galería externa de barro, *Reticulitermes flavipes*; (c) piso de madera bajo macetero dañado por *Reticulitermes flavipes*. Casa Blanca; (d) pared con daño *Reticulitermes flavipes*. Quintero. (Ripa et al., 2004).

galerías al interior del elemento. Sin embargo, antes de colapsar, se puede observar una gran cantidad de fecas cercanas al lugar.

Finalmente, Ripa et al. (2004) explica que la termita subterránea, conocida como *Reticulitermes flavipes*, no es voladora, y que se encuentra en la región metropolitana, en gran parte de la V región y en una localidad de la VI región. Esta especie se caracteriza por atacar especies de maderas como el pino Oregón, pino radiata, roble, álamo, olmo, eucalipto, entre otras. Ripa et al. (2004) añade que las termitas subterráneas tienen una gran cantidad de tierra en el interior de las galerías (ver Figura 148a). Además, construyen galerías de barro y excrementos en las superficies de las paredes por donde circulan en busca de alimentos, como se observa en la imagen Figura 148b. Las colonias se encuentran preferentemente en el subsuelo, por lo que generalmente los daños se encuentran en las estructuras cercanas al suelo, como en el caso de las uniones carpinteras utilizadas en viga o pilares, o como se aprecia en la imagen Figura 148c y Figura 148d, en revestimientos o estructura cercanas al suelo, así como en áreas con niveles de humedad elevados

## ANEXO 3

## Caso 1. Calle Higueras #179

El primer caso de estudio corresponde un bien inmueble ubicado en el pasaje Higueras #179, en el cerro Alegre de la ciudad de Valparaíso (ver Figura 149). La vivienda se emplaza en una importante área de interés turístico de la ciudad, dentro de la zona de amortiguación del sitio Patrimonio Mundial. El pasaje Higueras está conectado directamente con la calle Montealegre, una vía principal de acceso vehicular, que se vincula con el paseo Yugoslavo, un importante mirador de la ciudad donde se encuentra ubicado el Palacio Baburizza. El acceso al paseo desde el plan de la ciudad puede ocurrir peatonalmente por la escalera Apolo desde la calle Urriola, o por la escalera y ascensor El Peral desde la Plaza Justicia. Aunque no se han podido recabar muchos antecedentes históricos del inmueble, una antigua ficha técnica y registros cartográficos encontrados en el archivo histórico de Valparaíso indican que las viviendas construidas en el antiguo callejón de la Higueras, actualmente llamado pasaje Higueras, datan de principios del siglo XX.

El inmueble presenta rasgos del estilo arquitectónico victoriano, con una fachada continua de características simples y decoraciones metálicas en la cornisa. Exhibe un antetecho que oculta la canaleta, y desde el exterior se percibe como una vivienda de dos niveles (ver Figura 150). La fachada esta revestida con planchas de zinc y cuenta con tres ventanas regulares tipo guillotina, que conservan las defensas originales de hierro forjado de la edificación, así como marcos de madera de color verde. En la parte superior, presenta dos ventanas, y en la parte inferior, una ventana con paneles tipo persianas de lamas de madera también de color verde. La fachada incluye una puerta de madera, pintada del mismo color de las persianas, para el acceso al interior de la vivienda, así como un portón continuo a la estructura de la fachada para el ingreso al patio en el subterráneo de la vivienda. Aunque el inmueble tiene rasgos distintivos respecto a la casa esquina, la vivienda comparte características con el resto de las viviendas que continúan en el mismo pasaje.

Fig. 149  
Caso 1. Calle Higueras #179: (a) Plano emplazamiento caso Higuera y (b) fotografía de la fachada año 2023.



Escala 1:2000

■ Caso de estudio



La vivienda originalmente se diseñó con dos niveles, sin embargo, en la actualidad, presenta un tercer nivel considerado. La estructura se adosa al terreno escarpado del cerro con estrategias de asentamiento mixto, lo que implica la sustracción de terreno y adición de elementos constructivos para generar un zócalo en el subterráneo de la vivienda (ver Figura 152). Como se puede observar en la planta de la Figura 151, la distribución interior del primer y segundo nivel conservan la espacialidad original de la vivienda con un zaguán en la entrada que da acceso a un pasillo o corredor de distribución hacia los salones principales, secundarios y la escalera para acceder al segundo y tercer piso.

El caso de estudio se inspeccionó durante una etapa preliminar de proyecto de rehabilitación, mientras se llevaba a cabo el desmantelamiento del revestimiento para generar un primer análisis del sistema estructural de la vivienda, lo que permitió realizar una inspección de la estructura. El entramado de la vivienda es de la tipología plataforma, donde los muros de esta vivienda tienen una estructura tradicional, compuesta por pies derechos arriostrados con diagonales y dispuestos cada 60 cm entre las soleras superior e inferior. Las escuadrías de los elementos del marco varían entre los solera inferior y superior de 2"x4" y pies derechos de 4"x4". Por otro lado, los entrepisos de la vivienda se componen por vigas de roble de 2"x 6", dispuestas cada 0,5 m. Sobre el envigado se dispone un entablado de madera que configura la superficie del suelo.

El inmueble presenta problemas debido a la infiltración de aguas pluviales. Esto se produjo por una intervención incorrecta en las salidas de aguas lluvias en la acera de la edificación. Esta situación, sumada a la presencia de xilófagos, trajo consigo el deterioro completo de una solera inferior del primer nivel, lo que ocasiono la tracción en diversas uniones carpinteras, principalmente en las uniones caja y espiga con espera presente en los dinteles. Por otro lado, el inmueble presenta una gran infestación de xilófagos, no solo en uniones de carpintería, sino también elementos completos de la estructura, generando la necesidad de que estos sean reemplazados por nuevos elementos de madera (ver Tabla 22, Tabla 23 y Tabla 24).

Fig. 150  
Caso 1. Calle Higueras #179: Elevación frontal.

## Elevación frontal

Escala 1:200

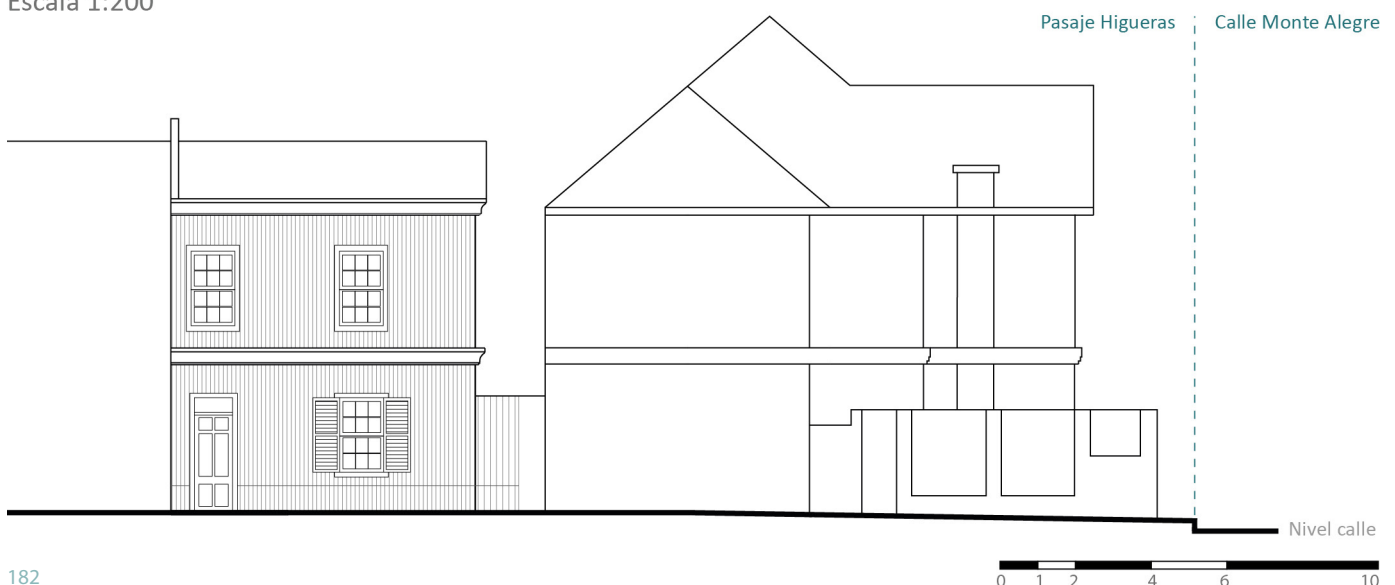


Fig. 151

Caso 1. Calle Higueras #179: Plano de planta nivel 1, escala 1:200. (U6 arquitectos, 2023).

Plano planta primer nivel  
Escala 1:200

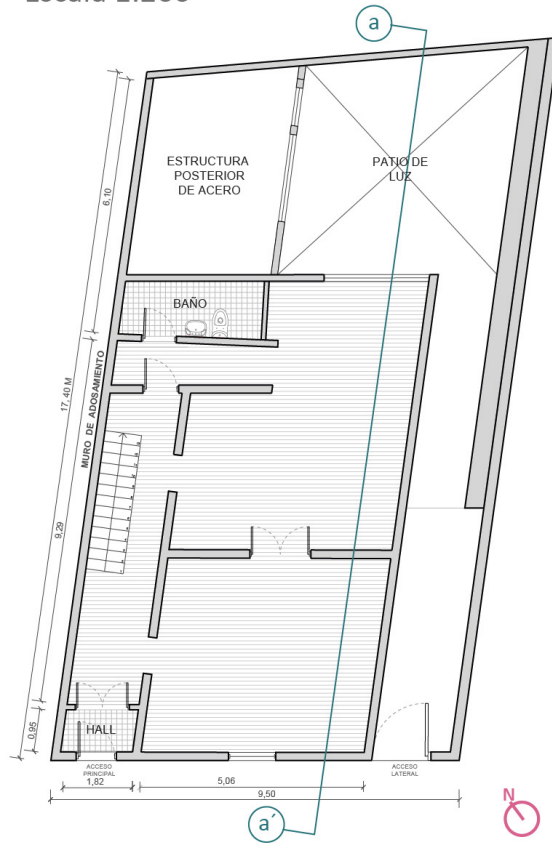
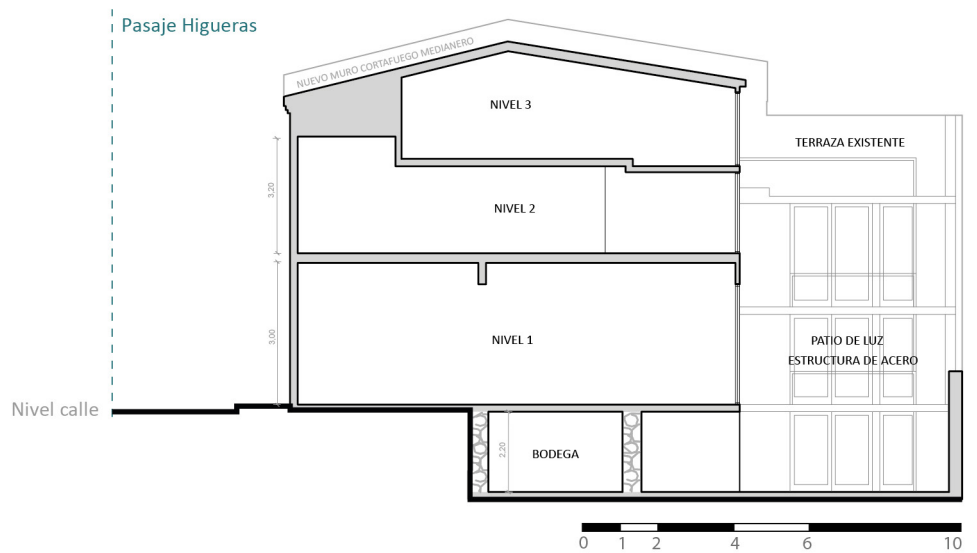



Fig. 152

Caso 1. Calle Higueras #179: Corte longitudinal a-a', escala 1:200. (U6 arquitectos, 2023).



Ficha Técnica		ID: 01				
Sección 1: Información General						
1.1. Dirección	Nombre del Inmueble: Higueras					
	Calle: Higueras					
	Número: #179					
	Cerro: Alegre					
	Rol: 3001-39					
1.2 Uso y clasificación patrimonial	Uso: vivienda					
	Año de construcción: 1900					
	N° de piso: 3					
	Estilo arquitectónico: Victoriano					
	Zona Sitio Patrimonio Mundial		Zona de Amortiguación	x	Zona de Conservación Histórica	x
	Protección Patrimonial	Sí x No	Tipo: Debe mantener la fachada			
Notas: Inmueble proceso de rehabilitación para cambio de uso.						
Sistema constructivo	Fachada principal	Paredes laterales	Paredes interiores	Entrepisos	Techumbre	
Híbrido						
Mampostería en piedra						
Albañilería de ladrillo						
Mixto (Madera/Tierra)	x	x				
Madera			x	x	x	
Acero/Hierro						
Adobe						
Alterado o modificado		x	x			
Revestimiento		Muros exteriores	Muros interiores	Entrepisos	Techumbre	
Zinc		x				
Yeso + pintura			x			
Palillaje (listones de madera y argamasa de tierra)						
Entablado de Madera					x	
Baldosas						
Planchas OSB						
Otro:						
Alterado o modificado:						

Tab. 23

Ficha técnica: uniones carpinteras tradicionales. Caso 1. Calle Higueras #179

Sección 4: Uniones carpinteras tradicionales						
4.1. Unión carpintera	Ensamble Caja y espiga		x	4.2. Ubicación	Encuentro entre pie derecho y solera (superior e inferior) / Dintel y pie derecho	
	Ensamble Embarbillado					
	Ensamble Cola de milano					
	Otra: Uniones por contacto		x		Encuentro en el elemento diagonal (riostra), parte superior e inferior	
5.1. Estado de conservación	Estado	Ensamble Caja y espiga	Ensamble Embarbillado	Ensamble Cola de milano	Otra unión:	
	Bueno					
	Regular	x			x	
	Malo					
<p><b>Nota:</b> El estado de conservación del ensamble caja y espiga varía dependiendo de la ubicación de la unión, y del nivel en el que se encuentra presente.</p>						
Tipología	Sintomatología	Agente patológico	Ensamble Caja y espiga	Ensamble Embarbillado	Ensamble Cola de milano	Otra:
i. Biológicas	a) Disgregación	1) Presencia de Xilófagos (termitas o coleópteros)	x			x
ii. Mecánicas	b) Agrietamiento	2) Carga y sobrecarga	x			x
	c) Separación de la unión					x
	d) Rotura					
	e) Fisura	3) Dilatación	x			
		4) Contracción				
iii. Físicas	f) Humedad	7) Capilar	x			
		8) Filtración	x			
<p><b>Nota:</b> El inmueble presenta un estado de abandono y problemas en diferentes uniones carpinteras producto de un asentamiento de la edificación debido a la desintegración de una solera inferior</p>						

<b>Sección 7: Observaciones</b>	
Unión carpintera	Observaciones
<b>Ensamble Caja y espiga</b>	<p>El ensamble caja y espiga con espera ubicado en el dintel se encuentran traccionado debido al asentamiento producido por el desvanecimiento de la solera. Este desvanecimiento se vio ligado a las infiltraciones de aguas lluvias y las termitas, afectando a todos los ensambles caja y espiga de la zona inferior del muro.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>Desvanecimiento solera inferior por humedad y termitas</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Grietas de corte por daños carga y sobre carga en la espiga.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Separación de los elementos por asentamiento</p> </div> </div>
<b>Otra: Uniones por contacto</b>	<p>Las uniones por contacto presentes en este caso se ven afectadas de manera severa en algunas partes del inmueble, debido a la presencia de xilófagos, las cuales en algunos casos logran desvanecer la unión por completo. Por otro lado, es común encontrar uniones por contacto con grietas por efectos acumulativos del sismo.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>Grietas en el sentido de la fibra de la riostra a través del clavo.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Unión por contacto dañada por xilófagos</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>

## ANEXO 4

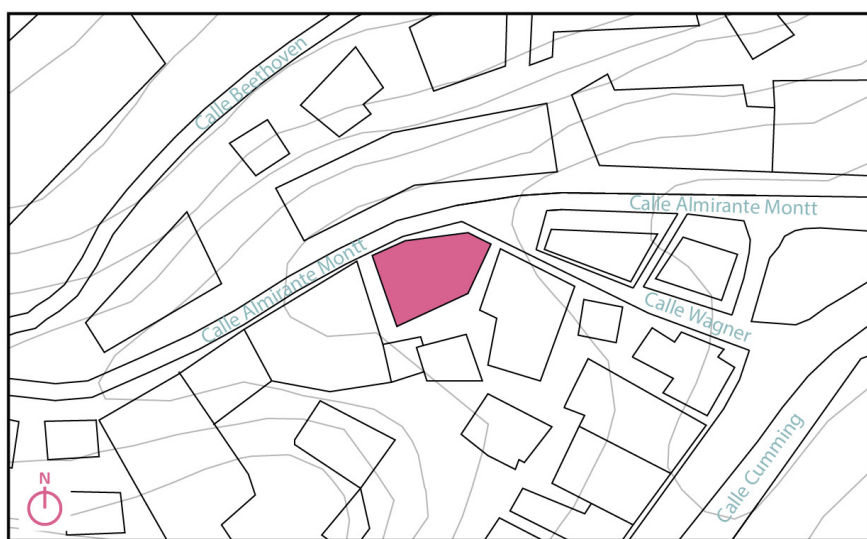
## Caso 2. Calle Almirante Montt #107 #109

El segundo caso de estudio corresponde a un inmueble ubicado en la calle Almirante Montt #107 #109 interceptado con calle Wagner en el cerro Concepción de la ciudad de Valparaíso (ver Figura 154). En este caso, la vivienda se emplaza a pie de cerro en una importante área de interés turístico dentro de zona de amortiguación del sitio Patrimonio Mundial de la ciudad. La calle Almirante Montt es una avenida vehicular principal del cerro Concepción, paralela a la avenida Cumming. Ambas vías principales conectan con diversos puntos turísticos. La calle Almirante Montt conecta directamente con la plaza San Luis, las calles Estanque, y Monte alegre, Guillermo Munnich y la avenida Alemania. Desde el plan, conecta con la calle Condell, la calle Esmeralda y la plazuela Aníbal Pinto.

El caso de estudio se compone de tres bienes inmuebles yuxtapuestos con una fachada continua de características simples (ver Figura 154). Cada inmueble presenta rasgos del estilo arquitectónico victoriano con decoraciones metálicas en la cornisa, y desde el exterior se observa la techumbre a dos aguas. El edificio se encuentra bajo el nivel de calle con un ante jardín enrejado y una escalera para acceder a este. Las fachadas se componen de un revestimiento de plancha de zinc de color naranja con murales pintados, característicos de la ciudad de Valparaíso. Además, presenta ventanas regulares tipo guillotina sin defensas, pero con marcos de madera con decoraciones en la parte superior en forma de cornisas. Las viviendas cuentan cada una con una puerta doble con marcos y la misma decoración en la parte superior que poseen las ventanas, además de poseer una ventana en la zona del ático de la vivienda. La fachada lateral que colinda con la calle Wagner presenta las mismas características que en su fachada principal, con la diferencia que no presenta acceso, solo cuatro ventanas tipo guillotina y una en el ático.

Fig. 153

Caso 2. Almirante Montt #97. (a) Plano emplazamiento y (b) fotografía de la fachada año 2023.



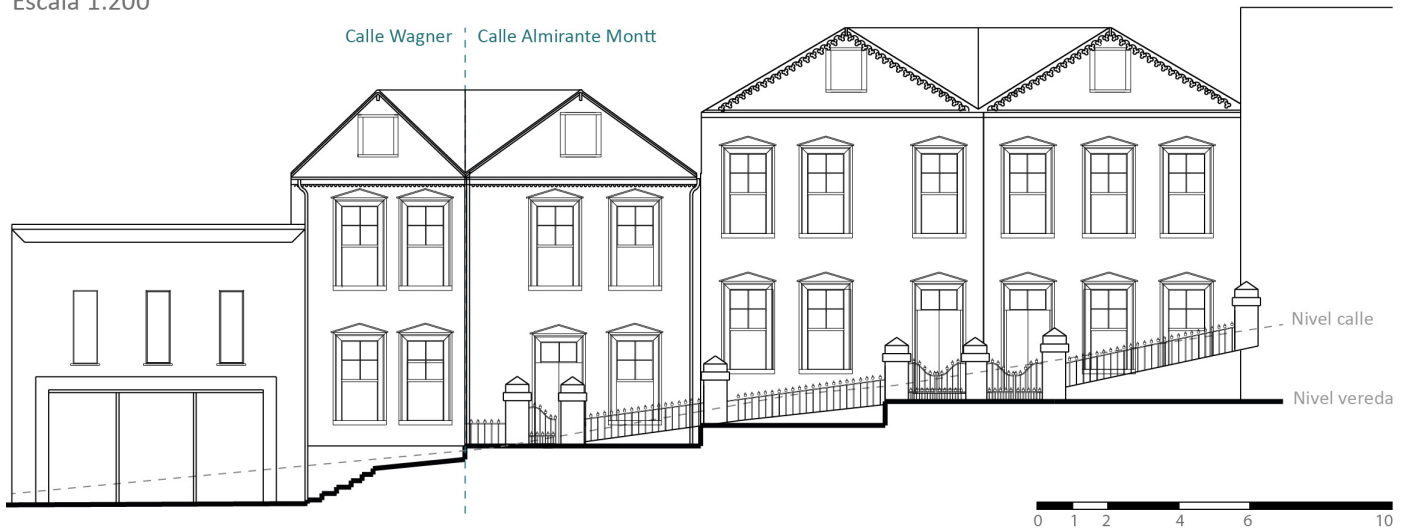
Escala 1:2000

Caso de estudio



## Elevación frontal

Escala 1:200



Dos de las tres propiedades son utilizadas como hostel, y presentan una configuración espejo, como se observa en la planta del edificio en la Figura 156. Ambas poseen dos niveles, además de un altillo en el entretecho y una bodega en el subterráneo. La bodega se encuentra bajo el nivel de calle y entre las fundaciones de mampostería de piedra y ladrillo en los muros medianeros (ver Figura 156 y Figura 157). Los tabiques interiores se componen de entramados de madera, configurados por pies derechos, soleras y riostras diagonales de 4"x6". Durante la inspección en el interior edificio, se pudo observar la estructura de entramado de madera a la vista en sectores como la escalera y en la separación de espacios comunes (ver Figura 155). Sin embargo, en zonas como habitaciones y baños, la estructura de madera estaba revestida con planchas de madera. En la Figura 155, se observa que los tres inmuebles presentan plantas relativamente regulares, que siguen la misma línea de cierre con un ante jardín común que presenta vegetación y una reja de hierro forjado.

Fig. 154

Caso 2. Almirante Montt #97. Elevación frontal. (DOM, 2023).

Plano planta primer nivel  
Escala 1:200

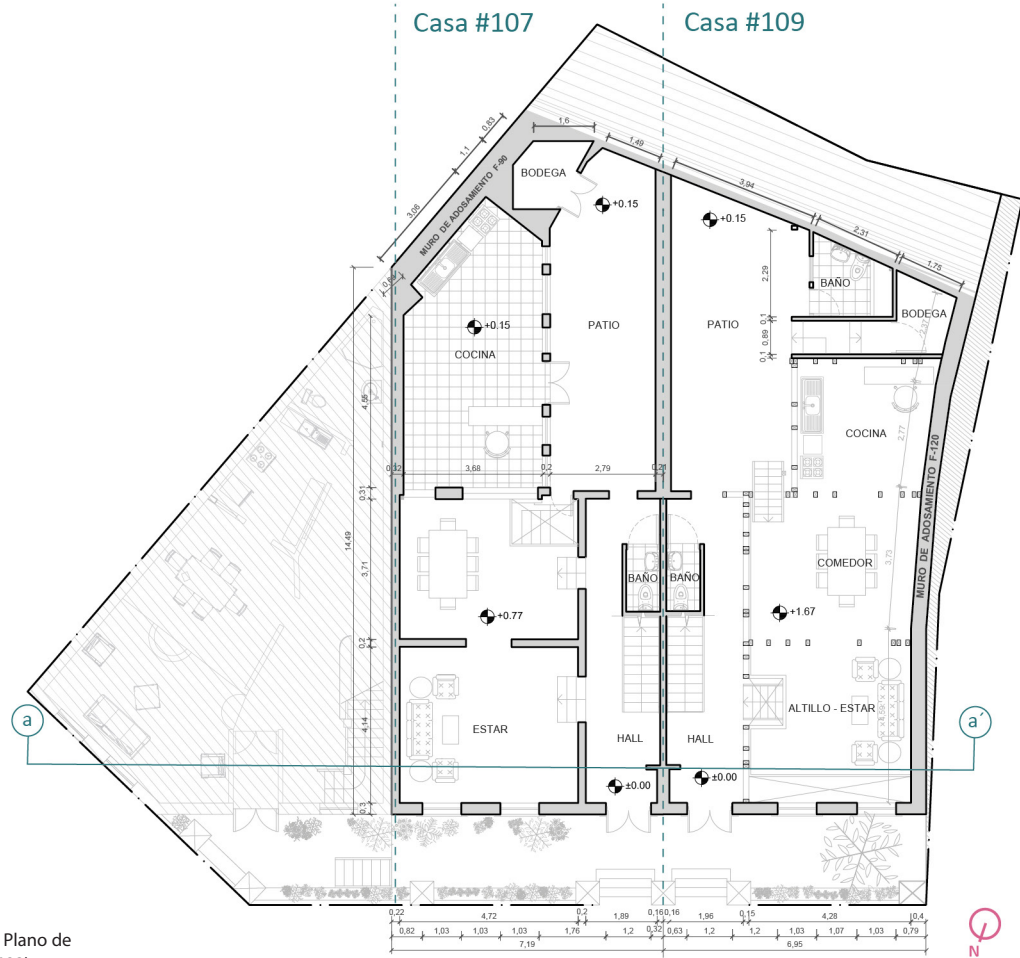


Fig. 155  
Caso 2. Almirante Montt #97. Plano de planta, escala 1:200. (DOM, 2023).

Corte Longitudinal a-a'  
Escala 1:200

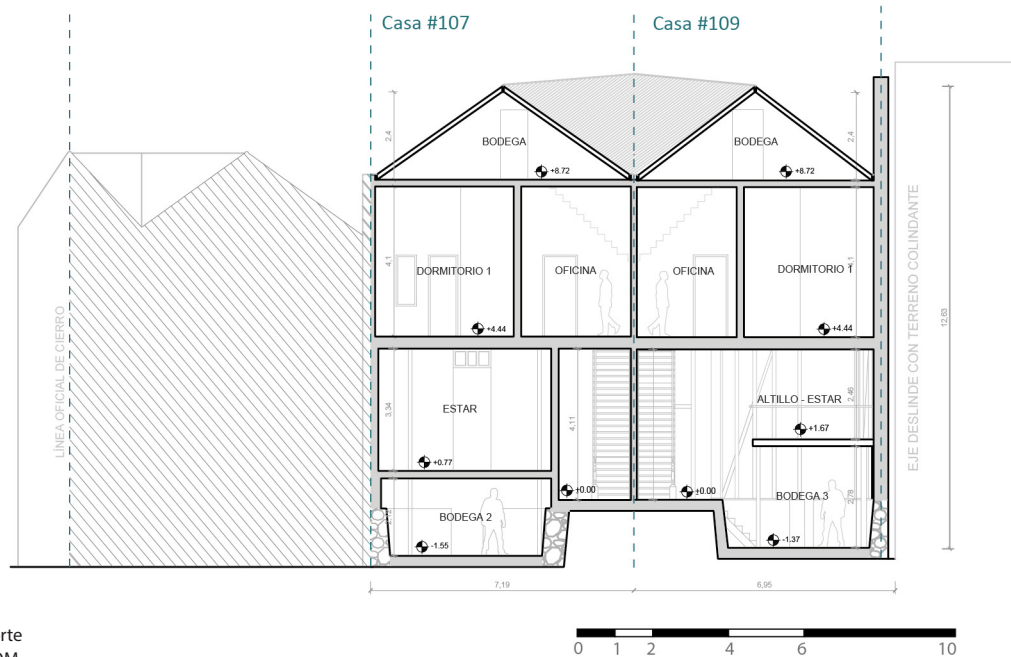


Fig. 156  
Caso 2. Almirante Montt #97. Corte longitudinal a-a', escala 1:200. (DOM, 2023).




El inmueble presenta un buen estado de conservación general, respecto a sus elementos de madera y las uniones carpinteras. Sin embargo, presenta diversas intervenciones en el espacio respecto a los pisos superiores debido al uso que actualmente tiene. Además, se observa la presencia de una intervención sobre dimensionada de reforzamiento para la estructura de madera, debido al desconocimiento de la capacidad de carga del inmueble (ver Tabla 25, Tabla 26 y Tabla 27).

**Fig. 157**  
Caso 2. Almirante Montt #97. Fotografías del muro de albañilería simple sobre fundación de mampostería en piedra.

Tab. 25

Ficha técnica: información general.  
Caso 2. Almirante Montt #97.

Ficha Técnica		ID: 02			
Sección 1: Información General					
1.1. Dirección	Nombre del Inmueble: Almirante Montt				
	Calle: Almirante Montt				
	Número: #107 -109				
	Cerro: Concepción				
	Rol: 3020-43 / 3020-44				
1.2 Uso y clasificación patrimonial	Uso: Hostal				
	Año de construcción: 1920				
	N° de piso: 3				
	Estilo arquitectónico: Ecléctico con rasgos neogóticos				
	Zona Sitio Patrimonio Mundial		Zona de Amortiguación	x	Zona de Conservación Histórica
Protección Patrimonial	Sí x No	Tipo: debe conservar la fachada			
Notas: Inmueble en buen estado de conservación, con restauración interna y con una intervención de refuerzo estructural sobre dimensionada.					
Sistema constructivo	Fachada principal	Paredes laterales	Paredes interiores	Entrepisos	Techumbre
Híbrido					
Mampostería en piedra					
Albañilería de ladrillo					
Mixto (Madera/Tierra)	x	x			
Madera			x	x	x
Acero/Hierro					
Adobe					
Alterado o modificado			x		
Revestimiento	Muros exteriores	Muros interiores	Entrepisos	Techumbre	
Zinc	x				
Yeso + pintura		x			
Palillaje (listones de madera y argamasa de tierra)					
Entablado de Madera		x	x	x	
Baldosas		x	x		
Planchas OSB		x	x	x	
Otro:					
Alterado o modificado:					

Tab. 26  
 Ficha técnica: uniones carpinteras tradicionales. Caso 2. Almirante Montt #97.

Sección 4: Uniones carpinteras tradicionales						
4.1. Unión carpintera	Ensamble Caja y espiga	x	4.2. Ubicación	Encuentro entre pie derecho y solera (superior e inferior) / Dintel y pie derecho		
	Ensamble Embarbillado					
	Ensamble Cola de milano					
	Otra: Uniones por contacto	x		Encuentro en el elemento diagonal (riestra), parte superior e inferior		
Estado	Ensamble Caja y espiga	Ensamble Embarbillado	Ensamble Cola de milano	Otra unión: Unión por contacto		
Bueno	x			x		
Regular						
Malo						
<b>Nota:</b> Las uniones presentes se encuentran en un buen estado de conservación.						
Tipología	Sintomatología	Agente patológico	Ensamble Caja y espiga	Ensamble Embarbillado	Ensamble Cola de milano	Otra: por contacto
i. Biológicas	a) Disgregación	1) Presencia de Xilófagos (termitas o coleópteros)	x			
ii. Mecánicas	b) Agrietamiento	2) Carga y sobrecarga	x			x
	c) Separación de la unión					x
	d) Rotura					
	e) Fisura	3) Dilatación				
iii. Físicas	f) Humedad	4) Contracción				
		7)Capilar				
		8)Filtración				
<b>Nota:</b> El inmueble presenta una estructura de reforzamiento sobredimensionada. En cuanto a las uniones se encuentran en buen estado, sin embargo, con la presencia de leves agrietamientos producto del uso de clavos.						

Tab. 27

Ficha técnica: observaciones. Caso 2.  
Almirante Montt #97.

Sección 7: Observaciones	
Unión carpintera	Observaciones
Ensamble Caja y espiga	<p>El ensamble caja y espiga en algunos casos se encuentra en buen estado. Sin embargo, en otros casos se observa el desvanecimiento de sectores de la solera inferior producto de las termitas. Además, de la presencia de grietas por daños acumulativos de sismos.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  <p>Ensamble en buen estado</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Perdida de solera por Termitas</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Grieta ensamble por Daños por sismo</p> </div> </div>
Otra: Uniones por contacto	<p>Si bien las uniones por contacto en algunos casos se encuentran en perfectas condiciones, en otras presenta daños acumulativos por sismos como lo es en el caso de las grietas y leve separación de los elementos de madera.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  <p>Unión por contacto en buen estado</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Grieta la unión por Daños por sismo</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Leve separación entre la riostra y el pie derecho</p> </div> </div>

## ANEXO 5

### Caso 3. Calle Monte Alegre #386

El tercer caso de estudio corresponde a un bien inmueble que data del siglo XX, específicamente del año 1918 y está ubicado en la calle Monte Alegre y #386 del cerro Alegre de la ciudad de Valparaíso (ver Figura 158). La vivienda se encuentra en una importante área de interés turístico de la ciudad, dentro de la zona de amortiguación del sitio Patrimonio Mundial. La calle Monte Alegre es una vía vehicular principal que se vincula con el paseo Yugoslavo, un importante mirador de la ciudad donde se encuentra ubicado el Palacio Baburizza. Además, conecta con la avenida Alemania, una vía que atraviesa de manera horizontalmente los diversos cerros que componen el anfiteatro de la ciudad. Asimismo, conecta de manera vehicular con la calle Miramar y el pasaje Higueras, donde se encuentra ubicado el primer caso de estudio. Actualmente, el inmueble se encuentra en proceso de rehabilitación de las instalaciones eléctricas, por lo que solo se pudo inspeccionar algunos sectores de la vivienda donde la estructura estaba a la vista.

El bien inmueble presenta similitudes con el primer caso estudio, el caso Higueras, ya que al igual que este bien, exhibe rasgos arquitectónicos del estilo victoriano con una fachada continua de características simples. La fachada incluye un antetecho que oculta la canaleta y desde el exterior se observa como una vivienda de dos niveles como se observa en la Figura 158. No obstante, presenta un antejardín enrejado y segmentado para cada vivienda que comparte la fachada continua. El revestimiento exterior de la fachada se compone de planchas de zinc de colores diferentes en el primer piso y segundo piso. Se observan tres ventanas regulares tipo guillotina con defensas de hierro forjado originales de la edificación y marcos de madera de color café. La estructura del inmueble se compone de un sistema de entramado de madera por pies derechos, riostras y soleras de sección 4"x4", como se observa en la Figura 159. El sistema de tabiques y muros interiores rellenos con adobillo presenta un estuco de barro, revestido con yeso y pintura para un acabado final.

Fig. 158  
Caso 3. Almirante Montt #97: (a) Plano emplazamiento caso Monte Alegre y (b) fotografía de la fachada año 2023.



Escala 1:2000

■ Caso de estudio

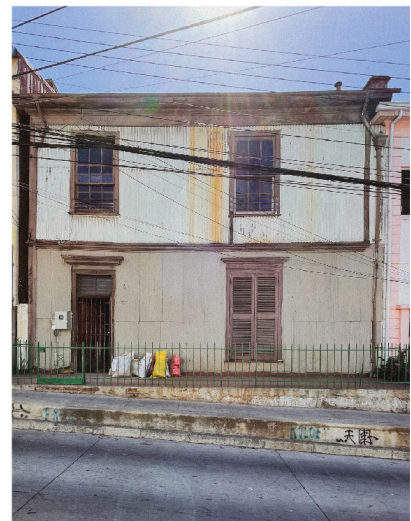




Fig. 159

Caso 3. Almirante Montt #97: fotografías de un (a) muro de fachada; y (b) unión de contacto parte inferior del entramado, conectando un pie derecho con una diagonal.

Este inmueble presenta un buen estado de conservación, en cuanto a las uniones carpinteras se observa que el ensamble embarbillado frontal se encuentra en buen estado, sin indicio de xilófagos, sin embargo, con una leve separación en la parte inferior de la unión. Por otro lado, los ensamble caja y espiga si bien la unión entre la caja y la espiga se encuentra en buenas condiciones los pies derechos presentan grietas cercanas a la unión por el uso de clavos (ver Tabla 28, Tabla 29 y Tabla 30).




Tab. 28  
 Ficha técnica: información general.  
 Caso 3. Almirante Montt #97.

Ficha Técnica		ID: 02			
Sección 1: Información General					
1.1. Dirección	Nombre del Inmueble: Monte Alegre				
	Calle: Monte Alegre				
	Número: #386				
	Cerro: Alegre				
	Rol: 3023-21				
1.2 Uso y clasificación	Uso: vivienda				
	Año de construcción: 1918				
	N° de piso: 2				
	Estilo arquitectónico: Victoriano				
	Zona Sitio Patrimonio Mundial		Zona de Amortiguación	x	Zona de Conservación Histórica
Protección Patrimonial		Tipo:			
		Sí x			
		No			
Notas: Inmueble en rehabilitación de las instalaciones eléctricas y restauración de paredes interiores.					
Sistema constructivo	Fachada principal	Paredes laterales	Paredes interiores	Entrepisos	Techumbre
Híbrido					
Mampostería en piedra					
Albañilería de ladrillo					
Mixto (Madera/Tierra)	x	x	x		
Madera			x	x	x
Acero/Hierro					
Adobe					
Alterado o modificado					
Revestimiento		Muros exteriores	Muros interiores	Entrepisos	Techumbre
Zinc		x			
Yeso + pintura			x		
Palillaje (listones de madera y argamasa de tierra)					
Entablado de Madera				x	x
Baldosas					
Planchas OSB					
Otro:					

Tab. 29

Ficha técnica: uniones carpinteras tradicionales. Caso 3. Almirante Montt #97.

Sección 4: Uniones carpinteras tradicionales						
4.1. Unión carpintera	Ensamble Caja y espiga	x	4.2. Ubicación	Encuentro entre pie derecho y solera (superior e inferior) / Dintel y pie derecho		
	Ensamble Embarbillado	x		Encuentro entre pie derecho y parte superior de la riostra		
	Ensamble Cola de milano					
	Otra: Uniones por contacto					
Estado	Ensamble Caja y espiga	Ensamble Embarbillado	Ensamble Cola de milano	Otra unión:		
Bueno	x					
Regular		x				
Malo						
<b>Nota:</b> El estado de conservación de ambos ensambles presentes en el inmueble se encuentran en un buen estado de conservación.						
Tipología	Sintomatología	Agente patológico	Ensamble Caja y espiga	Ensamble	Ensamble Cola de milano	Otra:
i. Biológicas	a) Disgregación	1) Presencia de Xilófagos (termitas o coleópteros)	x			
ii. Mecánicas	b) Agrietamiento	2) Carga y sobrecarga	x			
	c) Separación de la unión			x		
	d) Rotura					
	e) Fisura	3) Dilatación				
iii. Físicas	f) Humedad	4) Contracción				
		7)Capilar				
		8)Filtración				
<b>Nota:</b> El inmueble presenta un estado de abandono y problemas en diferentes uniones carpinteras, principalmente a daños por xilófagos y problemas de rotura en el ensamble caja y espiga.						

<b>Sección 7: Observaciones</b>	
Unión carpintera	Observaciones
Ensamble Caja y espiga	<p>El ensamble caja y espiga en algunos casos se encuentra en buen estado. Sin embargo, en otros casos se observa la presencia de grietas por daños acumulativos de sismos.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div>
Ensamble embarbillado	<p>Si bien las uniones por contacto en algunos casos se encuentran en perfectas condiciones, en otras presenta daños acumulativos por sismos como lo es en el caso De Una lleve separación de los elementos de madera.</p> <div style="text-align: center;">  </div>

## ANEXO 6

## Caso 4. Calle El Litre #1220

El cuarto caso de estudio corresponde a un inmueble ubicado en la calle El Litre #1220 del cerro El Litre de la ciudad de Valparaíso (ver Figura 160). La vivienda se sitúa a pie de cerro dentro del área de conservación histórica de la ciudad, junto a la escalera Bilbao, teniendo una posición de esquina en la cuadra. La calle el Litre conecta con las calles Fernández Albano, Ontaneda y Uruguay, en el centro de la ciudad. Además, conecta con importante infraestructura del sector como el Hospital Carlos Van Buren y el parque público El Litre. En el cerro, al igual que los casos anteriores, conecta con la avenida Alemania.

Al momento de la inspección, el inmueble se encontraba en un estado de transición, pasando de una materialidad a otra debido a la decisión del propietario de cambiar la estructura de entramado de madera a una vivienda de hormigón en el mismo sitio. Esto resultó en que la estructura de madera se encontraba en estado de desmantelamiento, mientras se llevaban a cabo labores como el curado de la losa de hormigón y la construcción de muros de hormigón en el segundo nivel de la vivienda.

El primer nivel del inmueble presenta en el exterior una estructura de albañilería confinada, con un interior con estructura secundaria compuesta por tabiques de entramado de madera. Estos tabiques se repiten en el segundo nivel y se componen de pies derechos y riostras de 4"x4", mientras que las soleras superior e inferior son de 2"x4". El interior de los muros de entramado de madera del primer nivel está relleno con bloques de adobillo. Mientras que en el segundo nivel las fachadas esta compuestas por entramados de madera revestidos por planchas de zinc en el exterior. Los muros y tabiques de este nivel son de entramado de madera, y se componen por pies derechos que se intercalan las medidas de 2"x4" y 4"x4" como muestra el diagrama de la Figura 161. A diferencia del primer nivel, los muros interiores del segundo nivel no están rellenos con bloques de adobillo. En su defecto, los muros

Fig. 160  
Plano emplazamiento Caso 4: Cerro el Litre #1220.



Escala 1:2000

■ Caso de estudio



tanto interiores como exteriores tienen un revestimiento tipo bahareque, compuesto por listones de 1"x1" recubiertos con una argamasa de paja y barro (ver Figura 162).

El inmueble presenta, en su primer nivel, un estado regular en cuanto a los elementos de madera. Se observa la presencia de termitas por los diminutos orificios en esta. No obstante, el daño no es uniforme en toda la superficie, sino que es leve en algunas áreas. En cuanto al segundo nivel, las uniones carpinteras están gravemente afectadas por las termitas, lo que ha generado la pérdida de elementos como la espiga y la solera inferior. Además, se observa la presencia de daños mecánicos en las uniones por contacto y en las uniones de caja y espiga. Estas lesiones han provocado el agrietamiento de

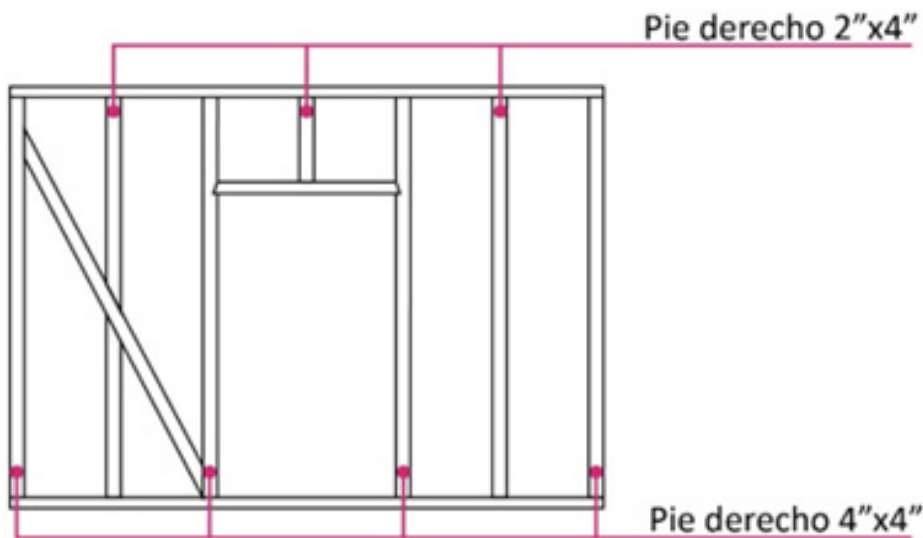


Fig. 161  
Disposición de pies derechos, caso El Litre.

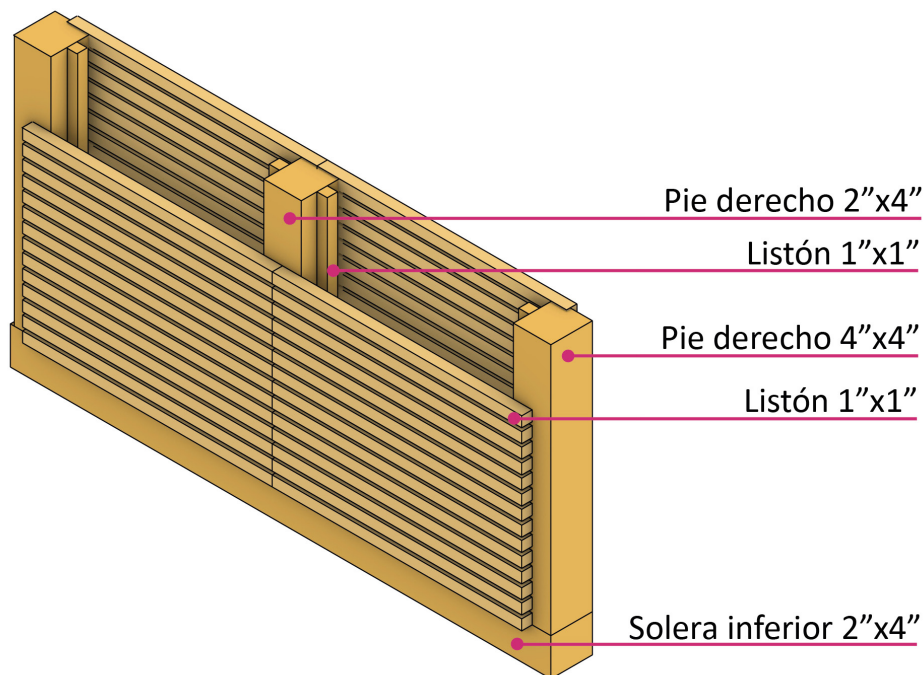



Fig. 162  
Técnica de bahareque en estructura de entramado de madera del segundo nivel.

Tab. 31

Ficha técnica: información general.  
Caso 4: Cerro el Litre #1220.

Ficha Técnica		ID: 04			
Sección 1: Información General					
1.1. Dirección	Nombre del Inmueble: El Litre				
	Calle: El Litre				
	Número: #1220				
	Cerro: El Litre				
Rol: 5052-7					
1.2 Uso y clasificación patrimonial	Uso: Vivienda				
	Año de construcción: Desconocido				
	N° de piso: 2				
	Estilo arquitectónico: Desconocido				
	Zona Sitio Patrimonio Mundial				
Protección Patrimonial	Sí	Tipo:			
	No				
Notas: Inmueble en cambio de materialidad de entramado de madera a hormigón					
Sistema constructivo	Fachada principal	Paredes laterales	Paredes interiores	Entrepisos	Techumbre
Híbrido	x				
Mampostería en piedra					
Albañilería de ladrillo	x				
Mixto (Madera/Tierra)	x				
Madera		x	x		x
Acero/Hierro					
Adobe					
Alterado o modificado	x	x		x	
Revestimiento		Muros exteriores	Muros interiores	Entrepisos	Techumbre
Zinc		x			
Yeso + pintura			x		
Palillaje (listones de madera y argamasa de tierra)			x		
Entablado de Madera					
Baldosas					
Planchas OSB					

Tab. 32

Ficha técnica: uniones carpinteras tradicionales. Caso 4: Cerro el Litre #1220.

Sección 4: Uniones carpinteras tradicionales						
4.1. Unión carpintera	Ensamble Caja y espiga		x	4.2. Ubicación	Encuentro entre pie derecho y solera (superior e inferior) / Dintel y pie derecho	
	Ensamble Embarbillado					
	Ensamble Cola de milano					
	Otra: Uniones por contacto		x		Encuentro en el elemento diagonal (riestra), parte superior e inferior	
Estado	Ensamble Caja y espiga	Ensamble Embarbillado	Ensamble Cola de milano	Otra unión:		
Bueno						
Regular				x		
Malo	x					
<b>Nota:</b> En general el ensamble caja y espiga en el encuentro inferior del pie derecho se encuentra afectado por termitas y por daños mecánicos.						
Tipología	Sintomatología	Agente patológico	Ensamble Caja y espiga	Ensamble Embarbillado	Ensamble Cola de milano	Otra:
i. Biológicas	a) Disgregación	1) Presencia de Xilófagos (termitas o coleópteros)	x			
ii. Mecánicas	b) Agrietamiento	2) Carga y sobrecarga	x			x
	c) Separación de la unión					x
	d) Rotura		x			
	e) Fisura	3) Dilatación				x
		4) Contracción				
iii. Físicas	f) Humedad	7)Capilar				
		8)Filtración				
<b>Nota:</b> El inmueble presenta un estado de abandono y problemas en diferentes uniones carpinteras, principalmente a daños por xilófagos y problemas de rotura en el ensamble caja y espiga.						

Tab. 33

Ficha técnica: observaciones. Caso 4:  
Cerro el Litre #1220.

<b>Sección 7: Observaciones</b>	
Unión carpintera	Observaciones
<b>Ensamble Caja y espiga</b>	<p>El ensamble presenta daño acumulativo por cargas y sobrecargas, además del daño acumulativo de los sismos. Daño traducido en grietas de corte por la misma línea de la espiga. Por otro lado, las termitas son un gran problema en este caso de estudio para el ensamble caja y espiga, llegando a desvanecer elemento de la unión como la espiga o solera. Caja agrietada por dentro debido a daños acumulativos por sismo y probable arrancamiento de la espiga.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">     </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> <span style="text-align: center;">Agrietamiento por daño acumulativo de los sismo</span> <span style="text-align: center;">Problema por termitas</span> </div>
<b>Otra: uniones por contacto</b>	<p>Las uniones por contacto que se encuentran cercanas a los ensambles caja y espiga presentan daños por termitas en menor grado. Por otro lado, se presentan daños acumulativos a través de la leve separación de las piezas.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> <span style="text-align: center;">Leve daño por termitas</span> <span style="text-align: center;">Leve separación por daño mecánico</span> </div>

## ANEXO 7

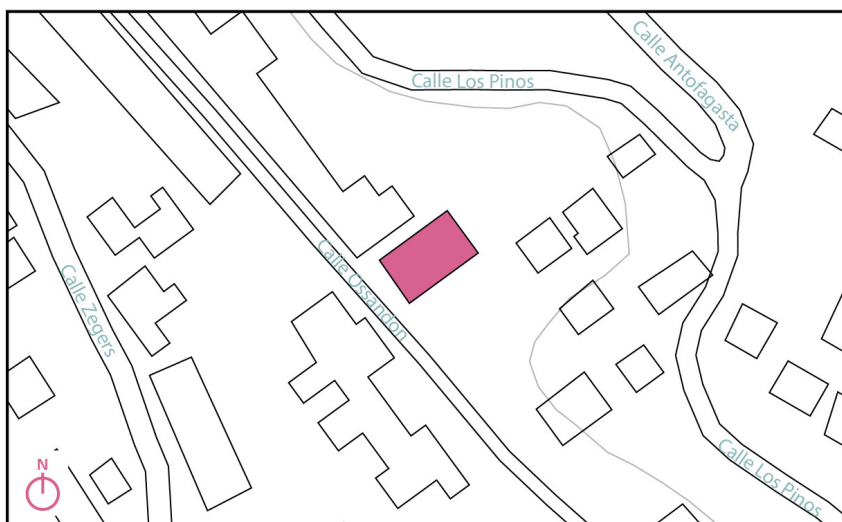
### Caso 5. Calle Ossandón #275

Finalmente, el quinto caso de estudio corresponde a un inmueble ubicado en la calle Ossandón #275 del cerro Delicias de la ciudad de Valparaíso (ver Figura 163). La vivienda se emplaza dentro de la zona de conservación histórica de la ciudad. La calle Ossandón conecta con una vía principal llamada Avenida Washington, que a su vez enlaza con la avenida Argentina, una vía principal del centro de la ciudad, y con diversos puntos de interés turísticos y servicios. Durante la inspección, el inmueble se encontraba en proceso de rehabilitación después de un periodo de abandono en el cual se deterioró la estructura. La construcción estaba en una etapa avanzada, y por esta razón una parte del edificio ya se encontraba estructuralmente rehabilitado, mientras que otra parte aún conservaba la estructura original del inmueble a la vista, que fue la que se inspeccionó en este trabajo.

La vivienda se compone de dos diferentes volúmenes continuos (ver Figura 164a). En la parte delantera del terreno, hay un volumen de planta rectangular de un solo nivel. Este primer volumen se compone por una estructura de hormigón en el exterior y una estructura secundaria de entramado de madera rellena con adobillo revestida con yeso y pintura. La segunda parte de la vivienda se encuentra yuxtapuesta en la parte posterior del volumen principal, y se compone por una estructura de dos niveles de entramado de madera rellena con adobillo en el primer nivel y sin relleno en el segundo (ver Figura 164b y Figura 164c). Los marcos de madera originales del segundo volumen se encuentran revestidos por tablas en dirección horizontal. La estructura del segundo nivel se conforma por pies derechos y riostras de 4"x4" y soleras de 2"x4".

El inmueble actualmente se encuentra en un mal estado de conservación debido al abandono que tuvo por años y la infiltración de aguas lluvias. Esto provocó el desvanecimiento de una solera inferior en el primer nivel, lo que trajo consigo el asentamiento del inmueble, generando la reacción

Fig. 162  
Plano emplazamiento caso 5: calle Ossandón #275.



Escala 1:2000

■ Caso de estudio






**Fig. 164**

Caso 5 Calle Ossandón #275: Fotografías que muestran (a) la composición de volúmenes; (b) volumen secundario que conserva la estructura original; y (c) estructura segundo nivel.

inmediatamente de las uniones provocando la tracción de diversas uniones, como el ensamble caja y espiga (ver Tabla 34, Tabla 35 y Tabla 36).




Tab. 34  
 Ficha técnica: información general.  
 Caso 5 Calle Ossandón #275.

Ficha Técnica		ID: 05			
Sección 1: Información General					
1.1. Dirección	Nombre del Inmueble: Ossandón				
	Calle: Ossandón				
	Número: #275				
	Cerro: Delicias				
	Rol: 6082-24				
1.2 Uso y clasificación	Uso: Vivienda				
	Año de construcción: 1900				
	N° de piso: 2				
	Estilo arquitectónico: Desconocido				
Zona Sitio Patrimonio Mundial		Zona de Amortiguación	Zona de Conservación Histórica		x
Protección Patrimonial		Sí	Tipo:		
		No x			
Notas: Inmueble en estado de abandono, actualmente en proceso de rehabilitación y restauración					
Sistema constructivo	Fachada principal	Paredes laterales	Paredes interiores	Entrepisos	Techumbre
Híbrido	x				
Mampostería en piedra					
Albañilería de ladrillo					
Mixto (Madera/Tierra)		x	x		
Madera			x		
Acero/Hierro					
Adobe					
Alterado o modificado					
Revestimiento		Muros exteriores	Muros interiores	Entrepisos	Techumbre
Zinc					
Yeso + pintura			x		
Palillaje (listones de madera y argamasa de tierra)					
Entablado de Madera				x	x
Baldosas					
Planchas OSB					
Otro:		x			
Alterado o modificado:					

Tab. 35

Ficha técnica: uniones carpinteras tradicionales. Caso 5 Calle Ossandón #275.

Sección 4: Uniones carpinteras tradicionales						
4.1. Unión carpintera	Ensamble Caja y espiga	x	4.2. Ubicación	Encuentro entre pie derecho y solera (superior e inferior) / Dintel y pie derecho		
	Ensamble Embarbillado					
	Ensamble Cola de milano	x		Encuentro perpendicular entre soleras inferiores		
	Otra: Uniones por contacto	x		Encuentro en el elemento diagonal (riostra), parte superior e inferior		
Estado	Ensamble Caja y espiga	Ensamble Embarbillado	Ensamble Cola de milano	Otra unión: por contacto		
Bueno	x			x		
Regular	x					
Malo			x			
<b>Nota:</b> El estado de conservación del ensamble caja y espiga varía dependiendo de la ubicación de la unión, y del nivel en el que se encuentra presente.						
Tipología	Sintomatología	Agente patológico	Ensamble Caja y espiga	Ensamble Embarbillado	Ensamble Cola de milano	Otra:
i. Biológicas	a) Disgregación	1) Presencia de Xilófagos (termitas o coleópteros)	x			x
ii. Mecánicas	b) Agrietamiento	2) Carga y sobrecarga	x			x
	c) Separación de la unión				x	x
	d) Rotura					
	e) Fisura	3) Dilatación				
iii. Físicas	f) Humedad	4) Contracción				
		7)Capilar	x			
		8)Filtración	x			
<b>Nota:</b> El inmueble presenta asentamiento debido a la desintegración de una solera inferior del primer nivel, producidas por la combinación de infiltración de aguas lluvias y xilófagos.						

<b>Sección 7: Observaciones</b>	
Unión carpintera	Observaciones
Ensamble Caja y espiga	<p>El ensamble caja y espiga se encuentra en diferentes estados de conservación, en algunos casos desapareció la solera inferior junto a la caja y espiga producto de la infiltración de aguas lluvias y la infestación de xilófagos. Por otro lado, se presentan grietas por los efectos acumulativos del daño sísmico.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>Solera inferior desintegrada</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Grietas en la unión por daños acumulativo producto de los sismos</p> </div> </div>
Ensamble Cola de milano	<p>El ensamble cola de milano encontrado se encuentra traccionado debido al asentamiento del inmueble, además, presenta un pie derecho encima debido a la necesidad de sujetar la techumbre en otras áreas en el proceso de rehabilitación.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">  </div>

