

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE REFUERZO PARA UNIONES CARPINTERAS EN CONSTRUCCIONES TIPO TABIQUE-ADOBILLO

Constanza Cornejo¹, Belén Jiménez², Luis Pérez³

Departamento de Arquitectura, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile,
¹constanza.cornejom@sansano.usm.cl, ²belen.jimenez@usm.cl

³Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile: luis.perez@usm.cl

Palabras clave: rehabilitación arquitectónica, sistemas constructivos mixtos, ensamble caja y espiga, solución de refuerzo para uniones carpinteras

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 adobillo, donde las piezas madereras 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 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 para abordar el diseño y prototipado de soluciones para el reforzamiento de las uniones carpinteras, alineadas con los principios modernos de la rehabilitación, integrando soluciones removibles, mínimas y sostenibles. En particular, este trabajo se enfoca en el reforzamiento del ensamble tipo caja y espiga, que es la unión más común en la tipología estudiada, utilizada principalmente para conectar pies derechos y soleras. La metodología propuesta incluye un análisis comparativo y cuantitativo respecto a las necesidades específicas de diseño para esta unión, evaluando las diferentes técnicas existentes en la literatura con el objetivo de diseñar una solución que se ajuste a sus requerimientos específicos.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera se reconocen por su carácter sismorresistente, siendo altamente valorados y reconocidos en regiones propensas a terremotos como Japón, Nueva Zelanda, Estados Unidos, Portugal y Chile (FSC España, 2018; Jiménez, 2015; Poletti et al., 2015). En Chile se propagaron en varias ciudades como Valparaíso, Santiago, Iquique, Coquimbo, entre otras (Benavides et al., 1994; Jorquera, 2022). No obstante, es en Valparaíso donde aún se conservan algunos de los ejemplares más emblemáticos del país, construidos con la técnica conocida como *tabique-adobillo*, que se caracteriza por su armazón de madera de roble o pino Oregón relleno con adobillo, donde las piezas se conectan a través de complejas uniones carpinteras como el ensamble caja y espiga (figura 1). Actualmente, los edificios históricos que utilizan esta técnica en la ciudad se encuentran experimentando preocupantes procesos de deterioro, ligados a la poca valoración y desconocimiento de esta cultura constructiva (Jorquera, 2014). A menudo las estructuras de entramado de madera son desprovistas de sus rellenos de adobillo para abordar la rehabilitación de los marcos, desconociendo el aporte estructural, y sobrecargando al resto del marco (Poletti et al., 2015).

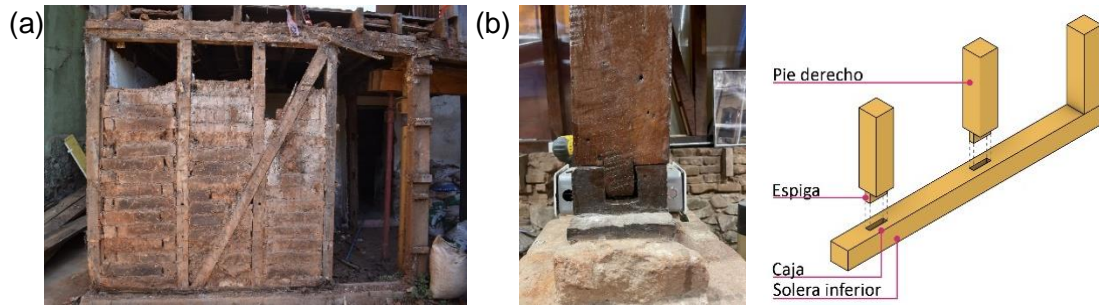


Figura 1. Entramado de madera (a) relleno con bloques de adobillos y; (b) fotografía y diagrama ensamble caja y espiga conectando pies derechos y soleras inferiores

En las construcciones tradicionales de entramado de madera, las uniones carpinteras suelen ser las encargadas de transmitir las cargas por contacto directo entre los elementos que conforman el sistema estructural, cumpliendo un rol crítico en el desempeño de las edificaciones, especialmente durante los sismos, permitiendo mantener y asegurar la integridad del armazón (Branco; Descamps, 2015). Por otro lado, el relleno de los marcos tiene un importante efecto de confinamiento de las estructuras, aportando rigidez y resistencia a los mismos marcos (Poletti et al., 2015). La falta de relleno en los entramados representa una de las condiciones más desfavorable de los muros, provocando que las conexiones se vuelvan más débiles ante la deformación lateral en caso de sismo (Poletti et al., 2015).

Autores como Parisi y Piazza, (2008) sostienen que, con frecuencia, la rehabilitación de inmuebles históricos requiere la readaptación de las conexiones tradicionales de madera debido al daño que puede existir 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 (Shiratori et al., 2008). Las estrategias para reacondicionar las estructuras de entramado de madera suelen enfocarse en las uniones. Sin embargo, debido a la gran versatilidad formal que caracteriza a este tipo de estructuras, existen múltiples caminos para abordar los diseños de las estrategias de reforzamiento. Esto supone un desafío a la hora de diseñarlas, y que estas sean efectivas y adaptadas a las solicitaciones de cada unión, considerando aspectos como su comportamiento y rol estructural, geometría, estado de conservación, entre otros. En este contexto, los métodos experimentales suelen ser de gran ayuda, ya que permiten determinar el comportamiento característico de las uniones y conocer sus modos de fallo, permitiendo diseñar sobre conocimiento empírico. No obstante, este tipo de enfoques generalmente no consideran procesos de diseño e inventiva previos al ensayo para diseñar el refuerzo, y, además, requieren un importante despliegue de recursos (laboratorios de ensayo de materiales, operarios y profesionales con conocimiento avanzado en el tema, así como recursos económicos y tiempo), lo que los convierte en métodos precisos pero muy exclusivos, que muchas veces son inaplicables en la práctica.

Durante las últimas dos décadas han aumentado la cantidad de investigaciones relacionadas al reforzamiento de las uniones carpinteras para diferentes tipos de juntas (Branco; Descamps, 2015; Palma et al., 2010; Parisi; Piazza, 2008; Poletti et al., 2015). En este contexto, las investigaciones teórico-experimentales han sido las más utilizadas por diversos autores (Li et al., 2021; Xue et al., 2021; Yu et al., 2022) evaluando el comportamiento de diferentes tipologías de uniones bajo diferentes condiciones de carga y contorno, para luego proponer soluciones de reforzamiento desde la observación empírica del comportamiento y los modos de fallos específicos de cada tipo de unión sin refuerzo.

Generalmente, las soluciones para el reacondicionamiento de las uniones carpinteras utilizan estrategias que parecen replicar antiguas técnicas de reforzamiento, incluso cuando se incorporan nuevas formas de fijación, como clavos, barras metálicas y tornillos autorroscante (Branco; Descamps, 2015). No obstante, investigaciones más recientes (Dai et al., 2022; Xue et al., 2021; Yu et al., 2022) exploran en el uso de materiales y dispositivos más novedosos, como el uso de amortiguadores y los materiales con aleaciones con memoria de forma (*shape*

memory alloy, en inglés). A pesar de estos valorables esfuerzos, muchas de estas investigaciones no consideran aspectos inherentes a los principios modernos de la conservación de las estructuras de madera, como aquellos establecidos por ICOMOS (1999), que promueven desarrollar 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.

La falta de enfoques para la resolución de problemas de inventiva en los procesos de reacondicionamiento de las uniones carpinteras generalmente se traduce en la replicación de técnicas ya existentes, con ligeras variaciones, sin interpretar de manera analítica las necesidades específicas de la unión a intervenir (Branco; Descamps, 2015). Es por ello que resulta necesario proponer una metodología para diseñar soluciones de reforzamiento empleando procesos de diseño que permitan optimizar recursos y tiempo, atendiendo las necesidades específicas de las uniones carpinteras. El presente artículo propone una metodología para diseñar soluciones de reforzamiento estructural para uniones carpinteras aplicando métodos semi-cuantitativos para la resolución de problemas de inventiva y análisis de las necesidades específicas de las uniones. La metodología propuesta será aplicada para analizar y diseñar soluciones de reforzamiento para el ensamble tipo caja y espiga (figura 1b), característico en los edificios que utilizan la técnica del tabique-adobillo en el centro histórico de la ciudad de Valparaíso.

2 METODOLOGÍA

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. La metodología propuesta corresponde a una readaptación de la primera fase de la “morfología del diseño” de Asimow (1962). Dentro de las herramientas que propone este autor se destacan los procesos para la formulación del problema, la evaluación comparativa de las soluciones existentes o benchmarking, el despliegue de la función de calidad, que sirve para analizar diferentes etapas en una matriz y la carta morfológica que ofrece una propuesta de posibilidades de diseño. Mas recientemente, Elizondo (2015), Rosas (2017) y Steinmeyer (2015) han propuesto versiones reformadas de este enfoque, adaptadas a las necesidades actuales del diseño de productos, e incluyendo otras herramientas para la búsqueda de soluciones como el diagrama de caja y el método de resolución de problemas con TRIZ.

La metodología propuesta para el diseño de soluciones de reforzamiento de uniones carpinteras se compone de nueve etapas: (1) la definición de la problemática; (2) el proceso de comparación de pares; (3) la resolución del diagrama de caja negra y transparente; (4) la evaluación comparativa del mercado; (5) una lista de requerimientos de la unión; (6) el despliegue de la función de calidad; (7) la creación de una carta morfológica; (8) la resolución de contradicciones con el método TRIZ y, finalmente, (9) la creación de conceptos. El método se aplica para proponer diferentes soluciones conceptuales de reforzamiento, ideas preliminares que luego puedan ser desarrolladas en detalle, incorporando geometrías, materiales, y detalles constructivos.

2.1 Etapa 1 - Definición de la situación

La primera etapa, definición de la situación, se asocia con la caracterización formal y estructural de la unión estudiada, desde, por ejemplo, documentos técnicos y otras investigaciones disponibles, considerando parámetros tales como la geometría, el material, la función de la unión en el marco, su comportamiento ante cargas externas, y el tipo de fallo de la unión, entre otras. Además, se definen preliminarmente las características que deberían poseer las soluciones de refuerzo. En este caso, algunos de los requerimientos se basan en los parámetros establecidos por ICOMOS (1999), y en las investigaciones de Palma et al.

(2010), Parisi y Piazza (2008), Xue et al. (2021), quienes estudiaron y definieron los modos de fallo de las uniones tipo caja y espiga. La problemática y estudio de necesidades aplicados a la unión caja y espiga se describen a continuación.

a) Caracterización de la unión caja y espiga

El ensamble caja y espiga tiene la función de transmitir las cargas verticales entre los elementos del marco, específicamente entre las soleras y pies derechos. Cuando existen cargas laterales, como aquellas provenientes de los sismos, la unión experimenta resistencia al momento, generando esfuerzos cortantes en la espiga y compresión perpendicular a la fibra de los elementos de madera, lo que puede ocasionar la separación de ambos elementos (Arriaga et al., 2011). Por otro lado, los estudios de Xue et al. (2021) y Yu et al. (2022) han demostrado que la implementación de soluciones de reforzamiento estructural ayuda a mejorar la capacidad de carga y de disipación de energía de las uniones, evitando la separación de las piezas.

b) Requerimientos del refuerzo: objetivos, restricciones y funciones

Luego de caracterizar la unión, se definen objetivos, restricciones y funciones de la solución buscada (Elizondo, 2015; Steinmeyer, 2015) con el fin de guiar las exigencias que debe cumplir el reforzamiento para la unión caja y espiga. Los objetivos se formulan bajo las condiciones que establece ICOMOS (1999), considerando como parte fundamental que el diseño del refuerzo: (i) tenga dimensiones moderadas, (ii) sea técnicamente removible, y que no comprometa la arquitectura del bien inmueble, considerando 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. Además, se consideran la (vii) facilidad 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 la sección de los elementos de madera, (ii) que no utilice fijaciones ni 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 la componen (Yu et al., 2022). Por último, se consideran las funciones que debe cumplir el refuerzo de acuerdo con las solicitudes de la unión. 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.

c) Segmentación de objetivos

En esta etapa se clasifican los objetivos definidos en la etapa anterior de acuerdo con las categorías: desempeño, seguridad, costos, y apariencia, tal como se definen en la metodología de Elizondo (2015) y Steinmeyer (2015), con el objetivo de jerarquizar su importancia en la siguiente etapa. El parámetro “desempeño” busca reconocer las necesidades técnicas del diseño, y, en particular para la unión caja y espiga, se consideran en esta categoría los objetivos que buscan que la solución de reforzamiento sea técnicamente removible para facilitar su eventual desinstalación, que sea liviano, y que utilice materialidades compatibles con la madera. La categoría “seguridad” considera los objetivos que buscan proteger la estructura, y, en específico se considera el objetivo que busca evitar la separación de las piezas que componen la unión y prevenir el daño del elemento y/o de la madera. La categoría de “costos” considera el presupuesto de realización y mantenimiento del refuerzo. Para esta clase se establece un nuevo objetivo: reducir el costo de producción y mantenimiento. Finalmente, la categoría de “apariencia” se centra en la función estética del refuerzo, y aquí se clasifica el objetivo que responde a lograr dimensiones moderadas del refuerzo con respecto a la sección transversal de la pieza de madera, evitando su sobredimensionamiento.

2.2 Comparación de pares

La integración de la metodología de comparación de pares, conocida como conocida como Pairwise Comparison Chart *desarrollada* por Saaty (1990), permite determinar la importancia relativa de cada elemento evaluado en la segmentación de los objetivos y establecer una jerarquía basada en una escala numérica. Para ellos se crea una matriz cuadrada para cada segmento en la que cada fila y columna corresponden a los objetivos clasificados en la etapa anterior. Cada par de categorías se compara y se le asigna un valor de acuerdo a la siguiente escala: 1 para objetivos de relevancia equivalente, 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. Una vez llena 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 los puntajes para obtener el peso relativo, que indica la importancia relativa de cada categoría en comparación con las otras. Finalmente, este procedimiento se repite para los objetivos dentro cada categoría, calculando el valor absoluto de cada objetivo a partir de la multiplicación del puntaje total del objetivo por el peso relativo de la categoría.

2.3 Métodos de diseño la caja negra y transparente

La metodología propuesta busca establecer una estructura de funciones óptimas para el diseño de la solución de refuerzo para la unión carpintera. Para ello se adoptan los métodos de diseño de la caja negra y de la caja transparente, que permiten identificar las interrelaciones entre flujos de entrada y de salida hacia la unión carpintera en conjunto con la solución de refuerzo, de esta forma se logra entender el correcto funcionamiento del producto que se esté diseñando. El método de la caja negra representa un modo de trabajo donde el proceso de diseño es opaco, es decir, no existe claridad de cómo se lograron los resultados. Generalmente en un diagrama de caja negra el diseño final está conformado por entradas referentes a la problemática, y otras provenientes de experiencias anteriores, mostrando solo las entradas y salidas del sistema, proporcionando una comprensión general del funcionamiento del producto sin detallar los procesos internos. En contraste, en el método de diseño de la caja transparente el diseñador genera sus ideas en base a una investigación previa, con objetivos variables y criterios de evaluación claramente definidos, revelando los procesos internos y mostrando el recorrido completo de los flujos y los criterios de análisis. Estas técnicas permiten entender la relación entre las demandas (entradas) y las solicitudes del diseño (salidas) a través de un planteamiento lógico del problema de diseño.

Generación de diagramas de caja y negra y transparente para la unión caja y espiga

El diagrama de caja negra para el ensamble caja y espiga muestra la entrada de las solicitudes estructurales que debe satisfacer la unión, tal como resistir ante cargas externas, verticales y laterales, asociadas a las acciones del peso propio y/o sobrecargas de uso y a los sismos. 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 impuestas a la estructura. Por otro lado, el modelo de caja transparente integra las funciones y subfunciones básicas que debe satisfacer la solución de refuerzo estructural en la unión para producir los flujos de salida del sistema. En este caso corresponde a (i) la función de disipación de energía, (ii) la correcta transmisión de cargas y (iii) 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.

2.4 Evaluación comparativa del mercado

Una vez se establecen las funciones que deben cumplir los diseños de refuerzo, se emplea el método de evaluación comparativa también conocido como *benchmarking*, una herramienta de análisis cualitativo que permite evaluar diversas soluciones existentes que cumplan una función similar al objeto que se está diseñando. En este trabajo, se evaluaron diferentes

soluciones de refuerzo desde diversos estudios publicados que utilizaron estribos, pernos internos, amortiguadores metálicos y láminas de polímeros reforzadas con fibra de carbono, entre otras. En esta etapa se contrasta y pondera cada una de las soluciones considerando si satisface o no y en qué grado los objetivos del diseño del refuerzo establecidos en la primera etapa de la metodología. Para ello se asigna un valor de 1 a los refuerzos que no cumplen con los objetivos, 3 a los que cumplen moderadamente y 5 a los que cumplen satisfactoriamente.

La figura 2 muestra la evaluación comparativa donde se destaca el amortiguador metálico como la solución mejor valorada, con una calificación de 4.6 puntos, sobresaliendo como el más adecuado a los objetivos establecidos en este estudio (sección 2.1). Le sigue el tirante de unión, una tira de acero que es un refuerzo técnicamente reversible y fácil de instalar, resulta adecuada y ligero. No obstante, esta solución requiere mantenimiento constante, ya que la tira debe mantenerse tensa para asegurar su correcto funcionamiento. En tercer lugar, se encuentran los estribos, que consisten en una placa dispuesta en ambos lados de la unión; que, aunque permite mantener la posición de la conexión, esta atraviesa la unión, transformándola en una solución semi reversible. Sin embargo, es un sistema fácil de instalar, liviano y de bajo costo en términos de producción como en mantención.

	Técnicamente reversible	Fácil de instalar	Liviano	Materiales compatibles	Proteger la unión de la separación	No cause daño en el elemento de madera	Bajo costo de producción	Bajo costo de mantenimiento	Adecuado al tamaño de la sección	Promedio
Solución de refuerzo	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 reforzada con fibra de carbono	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	3,2

Figura 2. Evaluación comparativa: comparación entre soluciones de refuerzos estudiadas por otros autores para reforzar uniones carpenteras y los objetivos propuestos en este trabajo.

2.5 Lista de requerimientos

Una vez comparadas y analizadas las diferentes técnicas de refuerzo desde la literatura, se procede a elaborar una lista de requerimientos de diseño con el objetivo de establecer criterios para diseñar las soluciones de refuerzo alcanzado los objetivos propuestos. Los requisitos se categorizaron en seis áreas principales: (1) geometría, relacionada con las dimensiones del refuerzo, el número de elementos y su peso; (2) su capacidad de carga, de acuerdo con la información técnica recopilada en la literatura; (3) su comportamiento estructural, vinculado al comportamiento característico de la unión, considerando su capacidad resistente al momento y naturaleza semirrígida; (4) la seguridad, orientada a cuidar la integridad unión, evitando adhesivos, zonas cortantes y provocando la falla dúctil; y (6) los costos, con énfasis en la reducción de los costos de producción y mantención. Estos parámetros se establecen con el

propósito de que sean considerados en el diseño del producto para lograr una efectiva satisfacción de los objetivos establecidos para este fin. 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 rendimiento necesarios, es decir aquellos que determinan si el requerimiento se comporta como un requisito (R) o es más bien un requerimiento deseado (D).

2.6 Despliegue de la función de calidad

El siguiente paso de la metodología implica el despliegue de función de calidad o *Quality Fuction Deployment* (QFD), representada por un diagrama tipo matriz denominada “casa de calidad”. Esta herramienta, inventada en la década del 1960 por Yoji Akao y Shigeru Mizuno (Tamayo; Bosch, 2004) se fundamenta en tres pilares. Primero, se identifica la voz del usuario; segundo, se organiza, consolida y traduce la información en signos visuales; y finalmente, se determinan las características de calidad del producto. Esta metodología gráfica provee un enfoque sistemático para descubrir tanto las necesidades declaradas como las no declaradas del diseño, ofreciendo una visión integral de las expectativas del usuario.

Despliegue de la función de calidad unión caja y espiga

La figura 3 muestra una matriz que representa el despliegue de la función de calidad, donde se evidencia la relación entre los requerimientos de la solución y la pertinencia de las soluciones estudiadas en la etapa evaluación comparativa del mercado, permitiendo un análisis macro de las necesidades para crear un refuerzo y los productos disponibles en el mercado, a través de los vínculos cuantitativos (relación numérica) y cualitativos (relación de signos) que se establecen en la en la matriz.

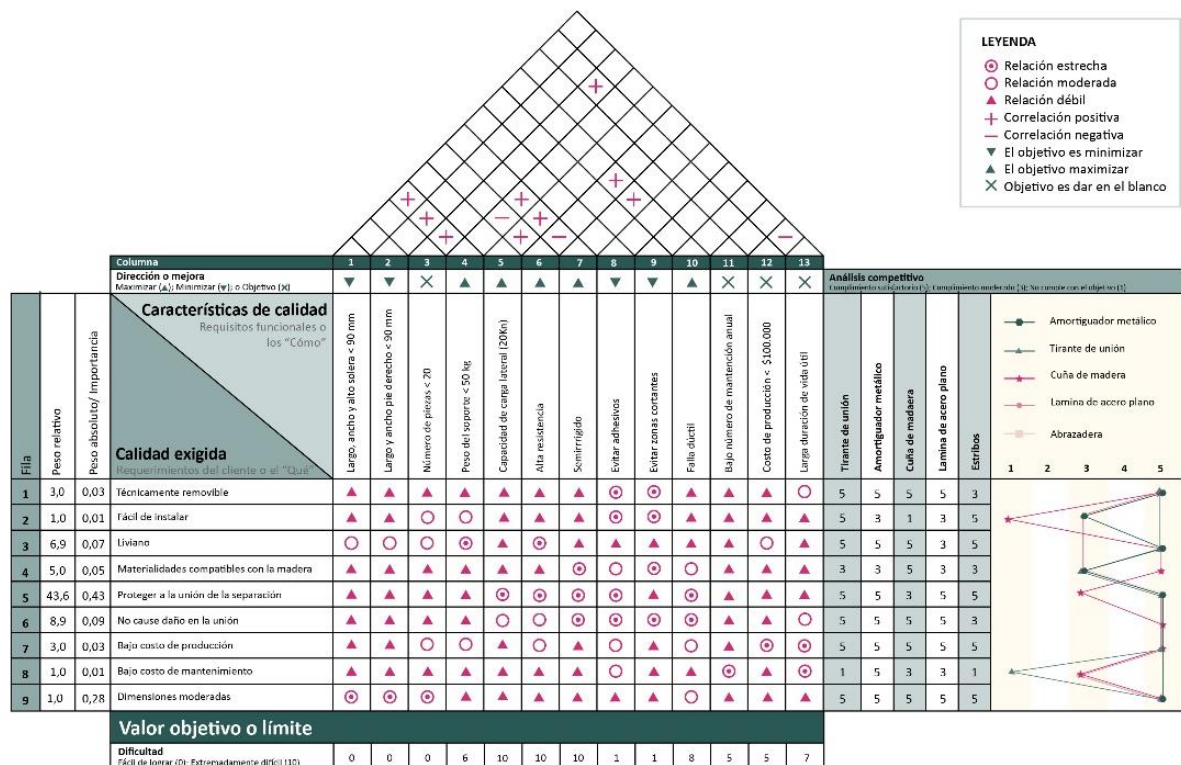


Figura 3. Despliegue de la función de calidad

En la parte central de la matriz se establece la relación entre los objetivos (calidad exigida) y los requerimientos (características de calidad). Los objetivos, en la parte izquierda, poseen los valores del peso relativo y absoluto correspondiente a cada uno. En la parte inferior de la matriz se estipula la dificultad de lograr los requerimientos especificados en la columna de

las características de calidad, mientras que en la parte superior se encuentra la correlación entre los requerimientos, siendo así el signo (+) la relación positiva entre parámetros y el signo (-) la relación negativa, lo que implica una contradicción del sistema. En la esquina superior derecha del diagrama se encuentra la valoración cualitativa de la evaluación comparativa en la cual se consideran las cinco mejores soluciones de refuerzo y como estas se evalúan respecto a los objetivos (calidad exigida).

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 Alshuller (2002) a comienzos del año 1946. Esta metodología se basa en el estudio de modelos evolutivos sobre patentes y el análisis de la resolución de diferentes problemas o contradicciones en un sistema, en el cual, a partir de una función principal "A" existirá otra función "B" que se verá perjudicada con la mejora de "A". La metodología TRIZ se compone de cuatro pasos que tienen como objetivo disminuir o erradicar las problemáticas del diseño mediante una matriz elaborada a partir de conceptos universales (Ames, 2008). El primer paso de la matriz consiste en transformar un problema específico en uno genérico mediante el uso de dos conceptos universales representativos pero opuestos, propuestos por el método TRIZ a través de una lista de conceptos. 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, los cuales representan los diferentes principios de inventiva que permitirán una mejora o erradicación de la contradicción.

Aplicación metodología TRIZ

La figura 3 muestra el despliegue de la función de calidad. La primera contradicción de la matriz resulta en la contraposición de la necesidad de generar una solución de alta resistencia frente al peso de la solución de refuerzo. Esta relación, se traduce, según la metodología TRIZ, en los conceptos genérico "resistencia frente al peso del objeto estacionario", y arroja dos soluciones para eliminar la contradicción desde el diseño del producto. En primer lugar, la segmentación o división del objeto en partes independiente 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 traduce según TRIZ en el concepto de "resistencia versus adaptabilidad". La primera solución para esta contradicción consiste en el "uso de una película flexible" y, en segundo lugar, considera 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. La última contradicción se genera 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. 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.

2.8 Carta morfológica

La Etapa 8 de la metodología 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. Asimismo, se incluyen las soluciones que emplean anclajes que atraviesan la madera, tales como los estribos y tornillos autorroscantes, y aquellas soluciones que hacen

uso de ambos métodos. Por otro lado, se considera 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 más utilizado 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.

3 RESULTADOS

El primer diseño conceptual derivado de la aplicación de la metodología propuesta se denomina placa compuesta y se configura con dos placas de material rígido, como el acero, dispuestas en cada uno de los elementos de madera que compone la unión carpintera, conectadas con otro material flexible, como se muestra en la figura 4a. Esta solución se posicionaría en la parte frontal y trasera de la unión, con el objetivo de afiatar a los elementos sin atravesar con perforaciones la junta. El segundo concepto, denominado “abrazadera compuesta” (figura 4b) se conforma con dos abrazaderas hechas con elementos tipo placa de un material resistente (acero), 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 de material flexible. El tercer concepto se denomina “doble placa compuesta lateral” (Figura 4c). Este dispositivo está configurado por dos placas de un material resistente, 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 otros elementos metálicos, como tirafondos. Además, se añade un material flexible en la parte superior de las placas planas para unir ambos elementos adheridos a la madera.

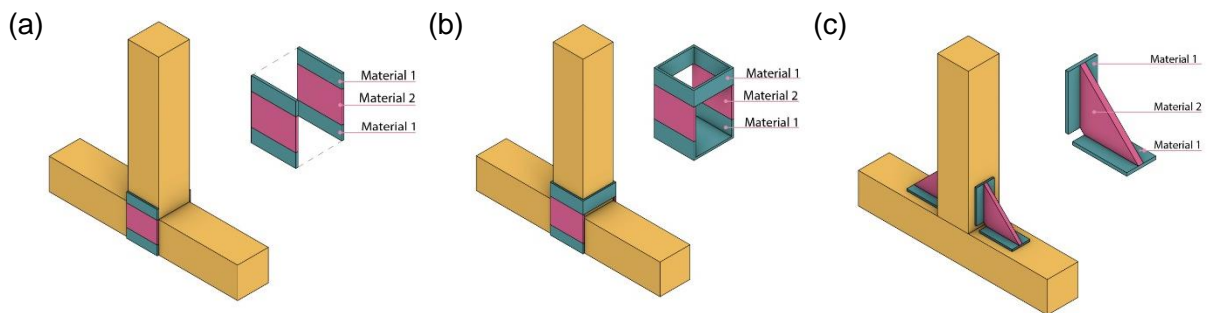


Figura 4. Conceptos de diseño: (a) placa compuesta, (b) abrazadera compuesta y (c) doble placa compuesta lateral

Una vez generado los conceptos estos son evaluados utilizando la misma metodología de evaluación comparativa contrastando con los objetivos planteados en la primera etapa. Posteriormente, se realiza el prototipado del reforzamiento para el ensamble caja y espiga, determinando los atributos técnicos y explorando materialidades, para posteriormente generar un proceso de iteración del diseño, un estudio analítico del funcionamiento y el diseño final de la propuesta.

La figura 5 muestra los modelos resultantes de los conceptos presentados anteriormente: “placa compuesta frontal” y la “placa compuesta lateral”. Ambas soluciones consideran la instalación de dos pletinas de acero y argollas de acero de 5 mm de espesor y sección, soldadas en los puntos de giro del cable tensor que conectará ambas piezas. El tensor se constituye con un cable de acero de $\frac{1}{4}$ ”, abrazaderas prensadas tubulares de $\frac{1}{4}$ ”, tensores de ojo – gancho de $\frac{1}{4}$ ” x 4”, y guardacabo de $\frac{1}{4}$ ”. Las fijaciones dentro de las placas de acero se

encuentran establecidas bajo la normativa del (Norma UNE-ENV, 1997), considerando fijaciones de $\frac{1}{4}$ " con una distancia de 25 mm entre ellas.

En particular, la solución "placa compuesta frontal" (figura 5a) considera la instalación del refuerzo en la parte frontal y trasera de la unión, con una placa superior de 90 mm y una inferior de 240 mm. Esta solución es apta para ser instalada in situ en estructuras de madera que quedarán a la vista, es decir, sin revestimientos, ya que las argollas de sujeción del cable podrían dificultar su instalación. Por otro lado, la solución de refuerzo proveniente del concepto "placa compuesta lateral" (figura 5b) propone utilizar dos placas de acero con las mismas características descritas en la solución anterior, con una longitud de 90 mm cada una. La placa superior se ancla lateralmente al pie derecho y la inferior se ancla en el canto superior de la solera inferior. Esta solución es adecuada para sistemas de entramado de madera cuando se han retirado los adobillos, pero considera un revestimiento de muro, dejando el refuerzo oculto.

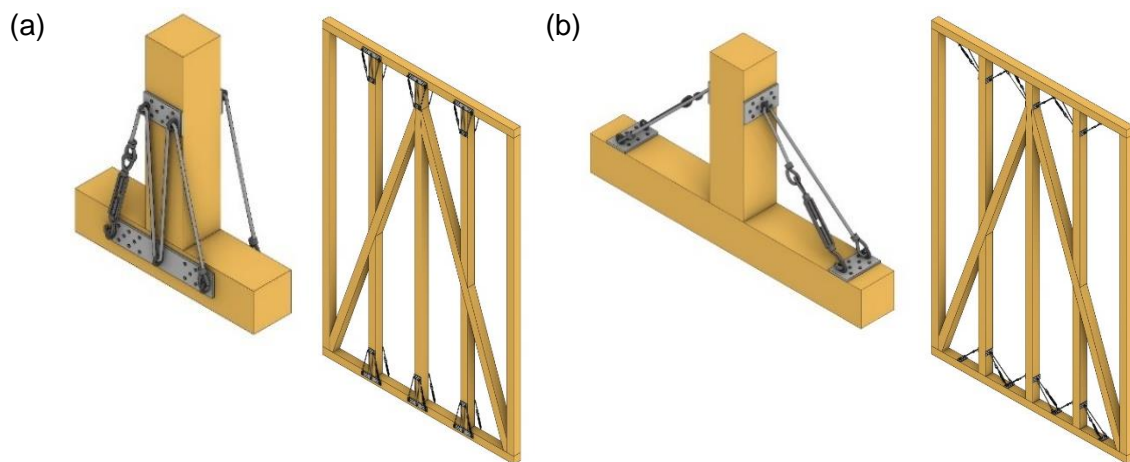


Figura 5. Modelos de las soluciones de refuerzo de la unión tipo caja y espiga proveniente de los conceptos de diseño desarrollados tras la aplicación de la metodología propuesta: (a) placa compuesta frontal y (b) placa compuesta lateral.

4 CONCLUSIONES

El presente trabajo propone una metodología para el diseño de soluciones de reforzamiento de uniones carpinteras presentes en los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera. El método propuesto se aplica para estudiar soluciones de reacondicionamiento para un ensamble tipo caja y espiga, característico de los edificios que emplean la técnica del *tabique-adobillo* en el centro histórico de la ciudad de Valparaíso, Chile.

Los entramados de madera, especialmente cuando son despojados de sus adobillos, son susceptibles al deterioro ocasionado por diversas amenazas, destacando el daño mecánico que se acumula en las uniones debido al efecto acumulativo de los sismos. El daño en estas juntas carpinteras se caracteriza principalmente por la desvinculación de las partes de un componente estructural, lo que deriva en la pérdida de rigidez y capacidad de disipar energía a nivel local y global en la estructura.

La situación 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 uniones. En particular, en los entramados de madera las uniones son puntos críticos, y afijar las piezas con sistemas de refuerzo puede ayudar a evitar la separación de los elementos madereros, incrementar la capacidad de carga y disipación de energía de toda la estructura, especialmente ante cargas sísmicas.

El uso de la metodología de inventiva para el diseño de soluciones de reforzamiento que combina aproximaciones teóricas cualitativas y semicuantitativas permite obtener resultados novedosos para problemáticas anteriormente ya resueltas, respetando los principios

modernos de conservación en estructuras históricas en madera. En particular, las soluciones resultantes se plantean como dispositivos que promueven la reversibilidad de la intervención en la estructura con la intención de no dañar el elemento de madera, considerando que el uso de placas separadas, pero unidas por un cable tensor permite que ambas sean soluciones técnicamente removibles y se resuelven con dimensiones moderadas, sin cubrir toda la sección de los elementos de madera.

Finalmente, la metodología proporciona soluciones que promueven estrategias de intervención mínimas y sostenibles, respetando el valor cultural y estructural asociado a las uniones carpinteras. Los trabajos futuros 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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>
- Arriaga, F.; Iñiguez, G.; Herrero, M.; Álvarez, R.; Fernández, J. (2011). Diseño y cálculo de uniones en estructuras de madera (MADERIA., Vol. 1).
- Asimow, M. (1962). *An introduction to design* (First Edition, Vol. 1). Prentice-Hall, Inc.
- Benavides, J.; Pizzi, M.; Valenzuela, M. (1994). *Ciudades y arquitectura portuaria: los puertos mayores del litoral chileno* (Universitaria). <https://libros.uchile.cl/1027>
- 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>
- 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>
- 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.
- FSC España (2018). *En Madera, otra forma de construir. El material constructivo sostenible del siglo XXI*. FSC ® F000228. www.es.fsc.org
- Altshuller, G. (2002). *40 principles, TRIZ keys to technical innovation* (third, Vol. 1). Technical Innovation Center, Inc.
- ICOMOS (1999). *Principios que deben regir la conservación de las estructuras históricas en madera*. International Council on Monuments and Sites. https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/wood_sp.pdf
- Jiménez, M. (2015). *Los entramados tradicionales de madera en los Cerros Alegre y Concepción* [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- 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.
- 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>
- Norma UNE-ENV (1995). *Proyecto de estructuras de madera*. Eurocódigo 5.
- Palma, P.; Ferreira, J.; Cruz, H. (2010). *Monotonic test of structural carpentry joints*
- Parisi, M.; Piazza, M. (2008). *Seismic strengthening of traditional carpentry joints*

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

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

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>

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>

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

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>

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>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Investigación, Innovación y Emprendimiento de la Universidad Técnica Federico Santa María por financiar el proyecto de investigación titulado “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) en el cual se enmarca la presente investigación.

AUTORES

Constanza Cornejo Mena, estudiante a magister en Rehabilitación Arquitectónica Sostenible, egresada de arquitectura de la universidad Técnico Federico Santa María (UTFSM), diplomado en Edificación con eficiencia energética y confort adaptativo – Universidad Nacional Autónoma de México.

Belén Jiménez, arquitecta UTFSM, doctora en ingeniería de la construcción por la Universitat Politècnica de Catalunya y académica del Departamento de Arquitectura de UTFSM. Su trabajo de investigación se centra en principalmente el análisis estructural, sísmico y rehabilitación arquitectónica de las construcciones históricas.

Luis Pérez, ingeniero mecánico de la PUCV y doctor en ingeniería mecánica por la UTFSM profesor auxiliar en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM, es. Su trabajo de investigación está orientado en la mecánica de sólidos computacional, comportamiento no lineal de materiales, materiales compuestos y espumas metálicas.