

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE SOLUCIONES DE REFORZAMIENTO DE UNIONES CARPINTERAS EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE ENTRAMADO DE MADERA

Constanza Cornejo, Belén Jiménez, Luis Pérez, Francisco Quitral, Ramiro Bazález

Universidad Técnico Federico Santa María

Eje temático: ¿Cómo innovamos para hacer sostenible la preservación de inmuebles patrimoniales de madera?

Palabras clave: Rehabilitación arquitectónica, reforzamiento de uniones carpinteras, sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera

Resumen:

Los edificios tradicionales de entramado de madera representan una parte importante del patrimonio arquitectónico chileno. En particular, la tipología conocida como *tabique-adobillo* se propagó por localidades como Valparaíso, Santiago, Coquimbo, y el campamento minero Sewell. En este sistema las uniones carpinteras son cruciales para dar estabilidad a la estructura, ya que son las encargadas de transmitir las cargas entre sus elementos y disipar la energía durante un sismo, lo que las vuelve vulnerables a daños por sobrecarga y a la separación de las piezas. Reforzar las uniones permite mejorar la capacidad y estabilidad de las estructuras, previniendo dicha separación. Esta investigación propone una metodología semicuantitativa para el diseño de soluciones de reforzamiento de uniones carpinteras, integrando la teoría de resolución de problemas de inventiva y los principios modernos de rehabilitación. La metodología propuesta se aplica para diseñar dos refuerzos para la unión caja y espiga, característica de la tipología *tabique-adobillo*.

Desarrollo:

Los sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera se reconocen por su carácter sismorresistente, siendo altamente valorados y reconocidos en regiones propensas a terremoto. En Chile los edificios que integran sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera son una parte importante del patrimonio material, destacándose los ejemplares existentes en los centros históricos de Valparaíso, Santiago, Coquimbo y Chiloé. Generalmente, los entramados de madera conectan sus elementos a través de complejas uniones carpinteras gracias a las cuales se transmiten las cargas por contacto directo y se disipa la energía sísmica. El rol de las uniones es fundamental para asegurar la integridad de del armazón durante un sismo (Branco & Descamps, 2015).

Las construcciones históricas de entramado de madera experimentan procesos acelerados de deterioro debido a factores como la degradación por ataque de termitas y daños mecánicos ocasionados por sobrecargas y sismos. El reforzamiento de las uniones permite reestablecer o mejorar la capacidad de las uniones y evitar la separación de las superficies de contacto. En este contexto, es común que se lleven a cabo estudios experimentales para comprender el comportamiento y modos de fallos de las uniones carpinteras, permitiendo diseñar soluciones de refuerzo sobre conocimiento empírico. No obstante, los enfoques experimentales generalmente no consideran procesos de diseño e inventiva previos a la ejecución de los ensayos; es decir, se resuelven los refuerzos con soluciones convencionales posterior a la observación los modos de fallo con el objetivo de prevenirlos. Además, las aproximaciones experimentales requieren un importante despliegue de recursos, lo que los convierte en un método preciso pero muy exclusivo, que muchas veces es inaplicables en la práctica.

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar una metodología semicuantitativa para diseñar soluciones de reforzamiento en uniones carpinteras existentes en sistemas constructivos tradicionales de entramado de madera, incorporando la teoría del diseño para resolver problemas de inventiva. Los objetivos específicos incluyen (i) caracterizar las uniones carpinteras de los sistemas constructivos de entramado de madera conocido como tabique-adobillo; (ii) evaluar el estado de conservación de las uniones carpinteras en servicio y determinar las principales causas de su deterioro; (iii) comparar y analizar diferentes estudios publicados, métodos y propuestas para abordar el diseño de soluciones de reforzamiento de uniones carpinteras; (iv) diseñar y prototipar soluciones de refuerzo para la unión tipo caja y espiga, características de la tipología constructiva bajo estudio (Figura 1).

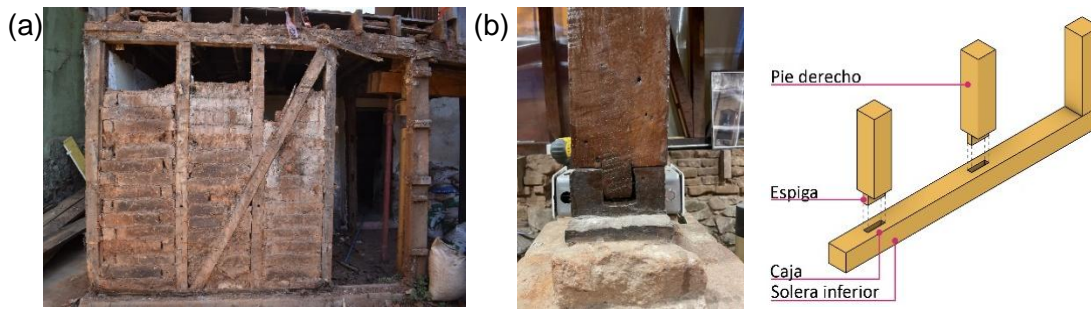


Figura 1. Entramado de madera (a) relleno con bloques de adobillos y; (b) fotografía y diagrama ensamble caja y espiga conectando pies derechos y soleras inferiores.

La metodología propuesta consiste en la resolución de una batería de actividades que se divide en nueve etapas (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**): (1) Definición de la problemática; (2) Comparación de pares; (3) Método de caja negra y caja transparente; (4) Evaluación comparativa del mercado; (5) Lista de requerimientos de la unión; (6) Despliegue de la función de calidad; (7) Creación de una carta morfológica; (8) Resolución de contradicciones con el método TRIZ y, finalmente, (9) Creación de conceptos. La consecución de estas etapas busca primero, comprender las características y necesidades de la unión bajo análisis, así como analizar soluciones existentes similares que hayan sido desarrolladas con anterioridad, para posteriormente proponer diferentes soluciones conceptuales e ideas preliminares de diseños de refuerzo que luego podrán desarrollarse en detalle incorporando geometrías, materiales, y detalles constructivos.

La metodología adopta la primera fase del método conocido como la “morfología del diseño” desarrollado por Morris Asimow (1962), método que fue posteriormente actualizado por los autores Elizondo (2015), Rosas (2017) y Steinmeyer (2015), incluyendo un enfoque adaptado a las necesidades actuales del diseño de productos.

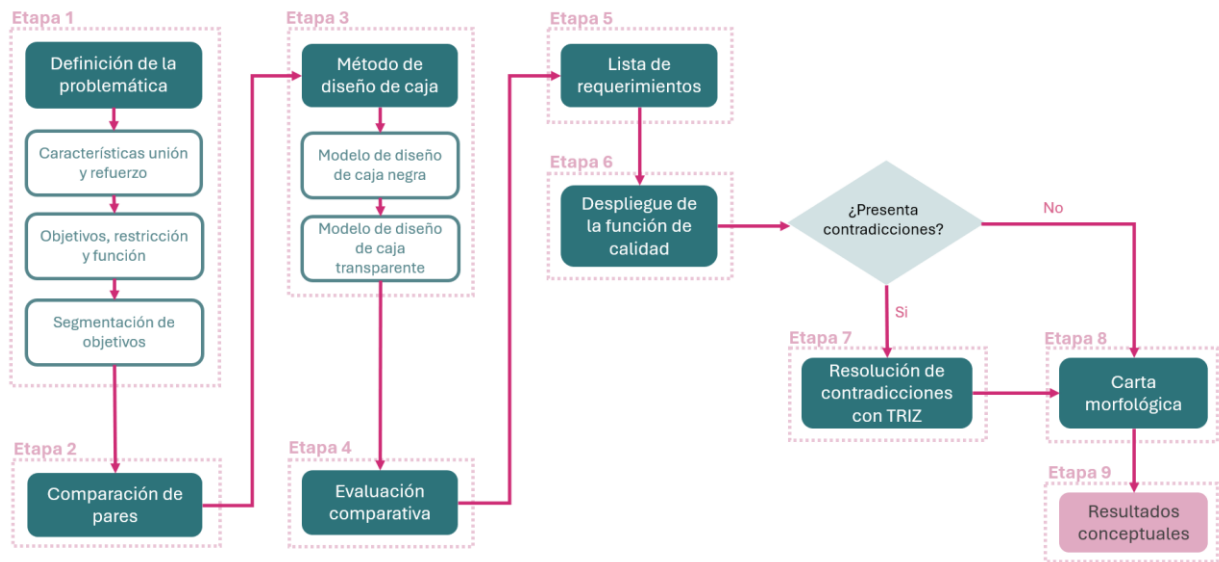


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para la creación de un concepto de refuerzo.

La Etapa 1 “Definición de la problemática” está asociada a la definición global del problema y la solución esperada, integrando una caracterización formal y estructural de la unión a partir de datos recopilados en campo, bibliografía publicada y documentos técnicos. En este levantamiento se considera la definición de aspectos geométricos y materiales, la función de la unión en la estructura, su comportamiento ante cargas externas, y el tipo de fallo característico, entre otras. Además, se definen preliminarmente los objetivos y características deseadas que deberían satisfacer las soluciones finales. Con el objetivo de buscar soluciones que vayan en línea con los principios modernos de la conservación, algunos de los requerimientos se basan en los parámetros establecidos por la carta emitida por el ICOMOS (1999), titulada “*Principios que deben regir la conservación de las estructuras históricas en madera*”, así como en investigaciones disponibles desde donde se puede estudiar el comportamiento características de las uniones tipo caja y espiga.

Después de caracterizar la unión, se definen los objetivos, restricciones y funciones que debe cumplir el reforzamiento en la unión caja y espiga. Los objetivos para la solución de refuerzo son: tener dimensiones moderadas, ser técnicamente removible, sin comprometer la arquitectura del inmueble, ser liviano, no causar daño en la unión, utilizar materiales compatibles con la madera y proteger la unión de separación de elementos. Además, se considera la facilidad de instalación en edificios existentes, el bajo costo de producción y la mantención. Posteriormente, estos objetivos se segmentan en las categorías de desempeño, seguridad, costos, y apariencia, con el fin de jerarquizar su importancia en la siguiente etapa.

La Etapa 2 “Comparación de pares”, integra la metodología conocida en inglés como *Pairwise Comparison Chart* que permite determinar la importancia relativa de cada elemento evaluado en la segmentación de los objetivos, estableciendo una jerarquía basada en la siguiente escala numérica: valor 1 para objetivos de relevancia equivalente, y valores 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.

En la Etapa 3 el “Método de diseño de caja negra y caja transparente” busca establecer un sistema de funciones óptimas que permitan resolver el problema de diseño de la solución de refuerzo de manera lógica. El primer paso corresponde al modelo de diseño de “caja negra”, que busca comprender de manera secuencial las cargas que afectan al conjunto del ensamble carpintero junto con el refuerzo, dejando abierta la siguiente pregunta: ¿Qué función deberá desempeñar el refuerzo en la unión para mantener la posición y la capacidad de carga de la conexión? Esta cuestión se resolverá en el modelo de diseño de “caja transparente”, en el cual se pretende establecer las funciones que deberá cumplir tanto el refuerzo como la unión para mantener la posición y la capacidad de carga.

Una vez se establecen las funciones que deben cumplir los diseños de refuerzo, se ejecuta la Etapa 4, “Método de evaluación comparativa”, también conocido como *benchmarking*. Esta es 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 reforzamiento a partir de diversos estudios publicados, los cuales utilizaron estribos, amortiguadores metálicos, láminas de polímeros reforzadas con fibra de carbono, entre otras (Figura 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En esta etapa, se contrastan y ponderan cada una de las soluciones, considerando si cumple o no, y en qué grado, los objetivos de diseño del refuerzo establecidos en la Etapa 1. Para ello, se asigna un valor de 1 a los refuerzos que no cumplen con los objetivos, 3 si cumplen moderadamente y 5 si cumple satisfactoriamente.

Solución de refuerzo	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
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 3. Evaluación comparativa. Análisis comparativo entre soluciones de refuerzos desarrollados por otros autores para reforzar uniones carpinteras vs los objetivos propuestos en este trabajo.

Una vez comparadas y analizadas las diferentes técnicas de refuerzo desde la literatura, se ejecuta la Etapa 5 que consiste en la elaboración de una lista de requerimientos de diseño con el objetivo de establecer criterios para diseñar las soluciones de refuerzo alcanzado los objetivos propuestos. Los requerimientos se categorizaron en seis áreas: geometría, capacidad de carga, comportamiento estructural, seguridad y costos.

A continuación, se ejecuta la Etapa 6 que implica el despliegue de función de calidad, o *Quality Function Deployment* (QFD), representada por un diagrama tipo matriz, denominado “casa de calidad”. Este método (ver Figura 4) tiene como objetivo mostrar la relación entre las etapas previamente desarrolladas a través de vínculos cuantitativos (relación numérica) y cualitativos (relación de signos), de esta forma expone problemas en el diseño de producto.

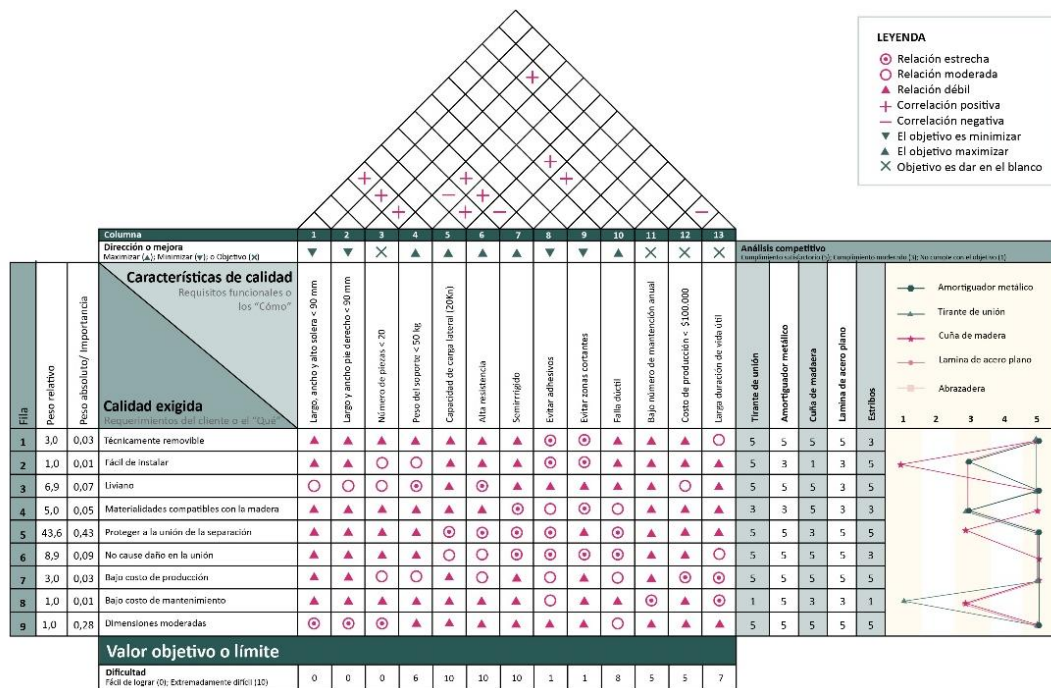


Figura 4. Despliegue de la función de calidad.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra algunas relaciones negativas (signo -) que representan contradicciones entre los requisitos funcionales del diseño y los requerimientos u objetivos definidos en la Etapa 1. Las contradicciones de diseño se resuelven en la Etapa 7 “Resolución de contradicciones con TRIZ (Teoría para Resolver Problemas de Inventiva)”. Método desarrollado por el autor Altshuller, (2002) basado en el estudio de modelos evolutivos de patentes y el análisis de la resolución de diferentes problemas o contradicciones en un sistema, donde a partir de una función principal “A” existirá otra función “B” que se ve perjudicada al mejorar “A”. El método se compone de cuatro pasos, cuyo objetivo es reducir o eliminar las problemáticas del diseño mediante una matriz elaborada a partir de conceptos universales.

Finalmente, se ejecuta la Etapa 8 “Carta morfológica” que representa el proceso de análisis de los pasos previos, principalmente de la evaluación comparativa 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, la posición y la materialidad del refuerzo.

Resultados

La metodología propuesta se aplica con el objetivo de desarrollar conceptos de diseño para el reforzamiento del ensamble caja y espiga, unión característica de los entramados tradicionales de entramado de madera conocidos como tabique-adobillo en Chile. La aplicación de la propuesta resulta en tres diseños conceptuales (Figura 5). El primer concepto, denominado “Placa Compuesta” (Figura 5a), se coloca en la parte frontal de la unión y está conformado por dos placas de material rígido, como el acero, conectadas

mediante otro material flexible. El segundo concepto, denominado “Abrazadera Compuesta” (Figura 5b), está compuesto por dos abrazaderas conectadas mediante una placa de materialidad flexible. Finalmente, el tercer concepto, “Placa Compuesta Lateral” (Figura 5c), se configura con placas dispuestas en los laterales del ensamble, conectadas mediante un material flexible.

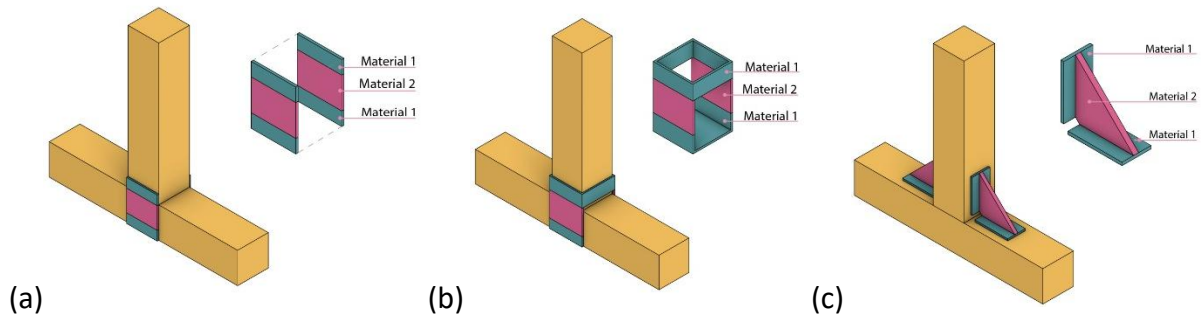


Figura 5. Conceptos de diseño: (a) placa compuesta, (b) abrazadera compuesta y (c) doble placa compuesta lateral.

Los conceptos se evalúan contrastándolos con los objetivos planteados en la etapa de definición de la problemática (Etapa 1), y se concluye que las soluciones que mejor se adecuan a estos corresponden a los conceptos de “Placa Compuesta Frontal” (Figura 6a) y “Placa Compuesta Lateral” (Figura 6b). A partir de esta evaluación, se realiza un estudio de parametrización, iterando los siguientes parámetros: posición y tamaño de la placa, orientación, posición y anclaje del cable. Posteriormente, se lleva a cabo un estudio analítico de la tensión que deberá resistir el cable cuando se encuentre a una determinada altura (h) y un ángulo (θ).

Finalmente, se define para ambas soluciones de refuerzo la instalación de dos pletinas de acero y argollas de acero de 5 mm de espesor y sección, soldadas en el punto de giro del cable tensor que conectara 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.

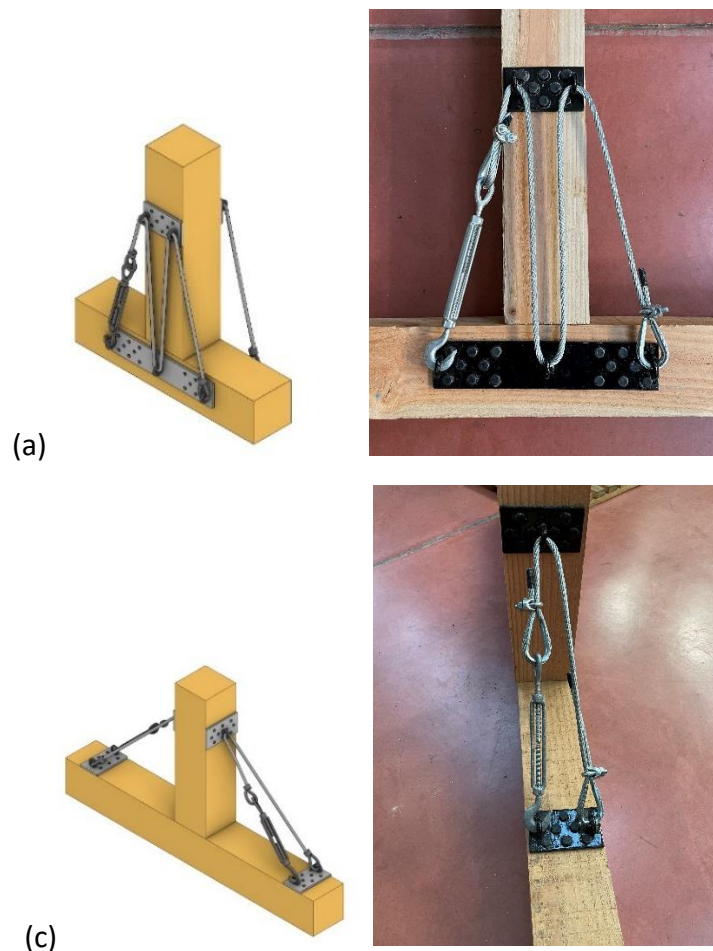


Figura 6. Modelos de las soluciones de refuerzo de la unión tipo caja y espiga proveniente de los conceptos de diseño desarrollados tras la aplicación de la metodología propuesta: (a) placa compuesta frontal y (b) placa compuesta lateral.

Conclusiones o consideraciones finales

Los inmuebles históricos de entramado de madera son susceptibles al deterioro ocasionado por diversas amenazas, destacando el daño mecánico que se acumula en las uniones debido al efecto de los sismos y las sobrecargas de uso. La problemática inherente a la degradación por daños mecánicos en las estructuras de entramado de madera puede mitigarse, en parte, a través del reforzamiento de las uniones.

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 específico, 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. Además, 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 propuesta 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 carpinteras.

Referencias bibliográficas (máximo 8)

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

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

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>

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.

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

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

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

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