

# Desarmabilidad en Uniones Carpinteras

## Análisis y su incorporación hacia una economía circular

Universidad de Chile - Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Estudiante: Daniel Solís Muñoz

Profesor guía: Felipe López Taverne

### Resumen

La desarmabilidad de estructuras es una práctica que se ha vuelto relevante en los últimos tiempos. El movimiento de "Design for Deconstruction", introduce conceptos como la circularidad a la disciplina de la construcción. Dentro de la arquitectura chilena, podemos afirmar que dichos principios ya los encontrábamos en las prácticas de restauración en las Iglesias de Chiloé, o incluso en la restauración de edificios patrimoniales de Valparaíso con la carpintería de armar. Es relevante entonces profundizar los conocimientos en torno al proceso de la desarmabilidad de las uniones carpinteras.

Para poder respaldar dicha afirmación se realizó un prototipo que permitió analizar y evaluar factores que influyen en desmedro de la desarmabilidad de las uniones, tales como la periodicidad de la acción, la incidencia e importancia de la clavija y la replicabilidad de estas en madera no nativa.

**Palabras clave:** Uniones Carpinteras, Design for Deconstruction, Desarmabilidad, Economía Circular, Protitpo.

### 1. Introducción

La crisis climática es un tema fundamental que ha tomado gran parte de las investigaciones académicas en distintas disciplinas, donde la arquitectura no es excepción. En la "Agenda 2030 para el desarrollo sostenible" (Naciones Unidas, 2016), existen dos puntos en los que la arquitectura, y esta investigación, se pueden enmarcar y desarrollar: "Ciudades y comunidades sustentables", y "Producción y consumo responsable". Transversal a estos puntos conecta un tópico esencial de evaluar: La materialidad.

El área de la construcción es de las actividades que posee las mayores tasas de consumo en cuanto a materias primas, y por ende, de producción de residuos. Un 34% de los residuos producidos en Chile pertenecen al área de construcción y demolición (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2010). Múltiples organizaciones se han enfocado en este tema, como CORFO, quienes mediante el programa "Construye 2025" buscan poner la mirada de la industria en las personas y la mitigación del impacto ambiental mediante iniciativas como la Guía de Ruta RCD (Gestión de

residuos de construcción y demolición), en conjunto con el Ministerio de Vivienda y el Ministerio del Medio Ambiente (Convenio Interministerial Construcción Sustentable, 2020).

Las discusiones e investigaciones en Chile se encuentra actualizadas en comparación con centros de estudios de otras partes del mundo, en parte gracias a fundaciones como Madera 21, quienes impulsan la utilización e innovación de la madera en los distintos ámbitos de la construcción. Un ejemplo de esto es que la última versión de la WTCE se desarrolló en Chile (WTCE, 2021), donde se presentaron investigaciones de relevancia a nivel internacional.

Dentro de los tópicos que son importantes en el mundo de la construcción para convertir la industria a una economía circular existe un movimiento llamado "Design for Deconstruction" o "Design for Disassembly", el cual postula que las edificaciones deben ser diseñadas de manera que estas puedan ser desarmables. Esto es beneficioso por: Concientizar acerca del final de la vida útil de las edificaciones, y además la gestión responsable de los residuos al momento que esto ocurra (EPA Region U, 2015).

En Chile existe un sistema constructivo que ha demostrado ser eficaz al momento de desarmarse y volver a armarse: Las uniones carpinteras (Verdugo, 2021).

Estas se encuentran en la zona central del país, en las construcciones patrimoniales de Valparaíso (Gonzalez & Maino, 2019), y en la zona sur, con las Iglesias de Chiloé (Verdugo, 2020). Estas últimas son la prueba empírica de que es un sistema que se puede desarmar y volver a armar con las restauraciones parciales e incluso completas que se han registrado (Almonacid, 2019).

Resulta de importancia entonces comprender que el fin de la vida útil de los edificios, va de la mano con entender los métodos que se deben implementar durante dicho proceso.

Entonces, en torno a la desarmabilidad y las uniones carpinteras surge una primera pregunta detonante: ¿Qué tan desarmables son las uniones carpinteras realmente, y cuales podrían ser las consideraciones a tener en cuenta en sus futuras aplicaciones?

Se plantea como objetivo principal de la investigación determinar si factores como la periodicidad del desarmado, la incidencia de la clavija y la ocupación de madera no nativa actúan en desmedro de la desarmabilidad de las uniones carpinteras chilotas y de Valparaíso, resultando en la pérdida de la capacidad de volver a armarse manteniendo características estructurales mínimas para ser reutilizables.

## 2. Antecedentes

### 2.1. Manejo de Residuos en la Construcción

Desde la Agenda 2030 elaborada por la ONU, se puede rescatar dos puntos mediante los cuales la arquitectura puede aportar: "Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sustentables", y "Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles" (Naciones Unidas, 2016).

Ward (2021), en los informes entregados durante la COP26, mencionó que el MINVU está proyectando distintos objetivos y estrategias para llevar a cabo dicho proceso, dentro de los cuales se encuentra el "Plan de construcción sustentable". Este habla de aumentar la sustentabilidad de las edificaciones e infraestructuras comprendiendo estas como un ciclo que posee principio y final (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2021).

*"La industria de la construcción es una de las principales consumidoras de materias primas dentro de nuestro país..." (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2010).*

Desde que esta afirmación se realizó los niveles de RDC (Residuos de Construcción y Demolición), solo han ido en aumento, alcanzando un nivel de hasta un tercio de los residuos totales a nivel país (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

La gestión que se está llevando a cabo en otros países es entonces de relevancia para entender posibles aplicaciones y beneficios que tendría implementar dentro de Chile, como podría ser el caso de Alemania, Suiza, Dinamarca e incluso Japón, quienes lideran en materia de recuperación y aprovechamiento de residuos sólidos. 0.9% de disposición de rellenos sanitarios contrasta fuertemente con el 52% correspondiente al promedio de Latinoamérica (Segura, Rojas, & Pulido, 2020).

### 2.2. Economía Circular

El calentamiento global no es el problema base, sino el resultado del fallido sistema consumista como lo es la economía lineal. La fundación Ellen MacArthur (2021) establece que consumir no es malo, de hecho, es el proceso mediante el cual las personas consiguen los insumos suficientes para vivir, sino que el problema viene con el pésimo manejo del final de la vida útil de estos bienes. Es aquí donde se encuentra la clave de la economía circular: entender el fin de la vida útil como el inicio de un nuevo ciclo productivo (Sthaer & MacArthur, 2019).

Al llevar la economía circular a la arquitectura, esta debe fijarse en dos cosas: Encontrar materiales que requieran de un menor consumo energético y de carbono, y además encontrar diferentes tecnologías o procesos que contemplen el manejo de los desechos (Morel, y otros, 2021).

La reutilización inteligente de materiales en el proceso constructivo resulta en una reducción de los costos, además, el hecho de que este esté siendo un tema tan atingente resulta en incentivos económicos por parte de empresas, desde la ingeniería, los proveedores de servicios, e instituciones privadas (Circulaire Boweconomie, 2018).

Al momento de elegir materialidad, entonces se debe preferir materiales que tengan un ciclo biológico regenerativo y mantengan su valor/utilidad durante el proceso, como por ejemplo: **La madera** (Mercado, 2020)

Esta logra disminuir hasta un 30% los costos asociados a plazos de ejecución en un proyecto, además de reducir hasta un 84% el impacto en el cambio climático de una construcción (Banco Mundial, 2020). De hecho, si hablamos de las emisiones totales que genera una construcción dependiendo de su materialidad, encontramos que un edificio en madera produce hasta un 40% menos que un edificio de hormigón armado en Chile (Felmer, y otros, 2021).

### 2.3. Design for Deconstruction

La gestión de residuos en la construcción es fundamental para la incorporación de la economía circular en la arquitectura. Cada vez existen mayores cantidades de regulaciones en los vertederos, y a su vez una menor cantidad de vertederos disponibles en el mundo (Rios, Chong, & Grau, 2015). También existe una carencia aún mayor en cuanto a la regulación a nivel mundial en torno al reciclaje de materiales, y sumado al hecho de que el costo y la velocidad que ofrece la demolición en temas de dar fin a la vida útil de un edificio (Cutieru, 2020), hace que generar estrategias de manejo de RDC, sean complicadas de implementar.

El concepto de Design for Deconstruction, o Design for Disassembly (DfD) nace de esta problemática. Si los edificios se diseñan para que estos se puedan desarmar o desmontar, se maneja de mejor manera los residuos que generan los edificios al final de su vida útil, y disminuir la cantidad de consumo de materiales crudos (EPA Region U, 2015).

Existen otras miradas que aportan conceptos nuevos y enriquecen la profundidad a la que este movimiento puede aplicarse, como por ejemplo diseñar para facilitar la recuperación de sistemas y la factibilidad de ser modificadas en un futuro (Cutieru, 2020).

También hay definiciones que distan de la mirada del desarmado de los edificios, sino apuntan a el proceso de "Deconstruction" como la restauración de piezas resultantes de la demolición de un edificio (Rios, Chong, & Grau, 2015).

Diseñar bajo la mirada de DfD, es seguir y cumplir con principios (EPA Region U, 2015), los cuales se clasifican en:

1. **Materiales:** Selección precavida de los materiales, utilización de materiales más fáciles de recuperar, minimizar el número de materiales, evitar composiciones de materiales no similares, etc.

2. **Uniones:** Minimizar número de componentes, minimizar la utilización de pasadores, usar pasadores en vez de pegamentos, simplificar las uniones, separar capas o sistemas, etc.
3. **Sistemas Constructivos:** Considerar la relación de los sistemas constructivos, su eficiencia y articulación, considerar uniones autosoportantes.

Akinade (2017) establece que el manejo cuidadoso de los materiales, construir de manera modular, la preparación del factor humano (Conocimiento de los procesos, manejo de las herramientas, comunicación entre equipos de trabajo, etc.) también son parte del movimiento DfD.

Dado que es un movimiento que sigue en desarrollo, se expondrán 3 casos que permiten entender en mayor profundidad los alcances de DfD.

#### "Respaces", Holanda

Empresa centrada en la construcción de edificios bajo una mirada circular. La madera en la mayoría de sus proyectos se debe principalmente al bajo costo energético, bajo consumo de carbono y facilidad de ser reutilizada. Otras de las virtudes de sus construcciones son lo durables que llegan a ser, lo viable económicamente, lo flexible de montar, disponer y desarmar, las grandes espacialidades que genera y el rápido proceso de construcción (RESPACE, 2019).

#### Rotor Deconstruction / Consulting", Bélgica

Rotor Deconstruction es una empresa que se concentra en la recolección de materiales de demolición que se puedan restaurar y almacenar para su posterior venta, por lo que desarmar edificios de tal manera que se dejen los elementos constructivos lo más intactos posibles permitiría beneficiarse de un mercado con lo que se pueda recuperar parte de la inversión gastada.



**Fig.1:** Respaces. Fuente: Imagen extraída de REspaces (The Exploded View Beyond Buildings, 2021).



**Fig.2:** Rotor Deconstruction. Fuente: Imagen extraída de "Rotor Deconstruction / Consulting", <https://rotordc.com/>



**Fig.3:** Proyecto Spacelab. Fuente: Artículo web: Spacelab's Experimental Shelter is Energy Self-Sufficient and Designed for Disassembly (Cutieru, 2021).



**Fig.4:** Registro de una Unión de caja y espiga con Media madera. Fuente: Uniones Carpinteras - Tradición, técnica y cultura de un Oficio (Verdugo, 2020).

## "Zero: Spacelab, Italia"

Zero es un proyecto diseñado para ser un refugio autosustentable energéticamente, que se pueda armar, desarmar y trasladar a diferentes entornos naturales (Cutieru, 2021).

Del proyecto se rescata que la definición desde un principio del fin la vida útil de una construcción le permite ser menos dañina con el medio ambiente al momento de su término, y el hecho de que una construcción se diseñe para ser desarmable le permite trasladarse y armarse en distintos contextos de ser necesario.

## 2.4. Uniones Carpinteras

Una de las prácticas chilenas que construye sistemas estructurales que son posible de desarmar es la Carpintería de Armar.

*"La carpintería de armar promueve un sistema constructivo basado en la prefabricación... de componentes en madera que se encajan y traban para formar un continuo resistente..."* (Gonzalez & Maino, 2019).

Parte de esta cultura se da en la zona sur del país, donde las Iglesias de Chiloé toman un rol importante como referente (Verdugo, 2020). Según Berg (2007), en un inicio casi todas las uniones fueron pensadas y construidas en madera, basándose en tarugos, ensambles o empalmes. Pero no solo se encuentran en Chiloé, también existen evidencias de su presencia en la zona central del país, en parte de las construcciones patrimoniales de Valparaíso (Gonzalez & Maino, 2019).

Gracias al sistema constructivo de las iglesias, en los últimos años ha sido posible el desarmado y la restauración completa de algunas de estas edificaciones (Almonacid & Medina, 2014). Este proceso se puede clasificar en 3 grados de intervención: Restauración Integral, Restauración Parcial y Restauración Comunitaria (Almonacid, 2019).

Las uniones carpinteras se han ido perdiendo con el tiempo, principalmente por el abandono del oficio carpintero y la implementación de otros tipos de materialidades que no necesitan del tratamiento de la madera (Verdugo, 2020). Investigaciones como "Work flow for a Timber Joinery Robotics" (Quitral, González, García, & Martínez, 2020), visibiliza este sistema constructivo y explora nuevos métodos mediante los cuales se puedan construir, como es el



**Fig.5:** Registro de una unión de media madera en cruz oblicua. Fuente: Libro, Uniones carpinteras de Valparaíso, (Gonzalez & Maino, 2019).

caso de la incorporación de un brazo robótico en el proceso de fabricación de las piezas el cual corte las uniones mediante programación en computadora.

Para diseñar en uniones carpinteras es importante revisar y analizar las distintas tipologías de uniones carpinteras existentes, y así comprender la mejor utilización según los requerimientos de cada estructura, ya que cada unión posee una función distinta dependiendo de la utilidad que se le otorgue (Fuentes, Mattei, Sánchez, & Velásquez, 2021).

### 3. Metodología

La investigación se dividió en tres etapas: Definición y clasificación de uniones, diseño de los prototipos y la experimentación, y finalmente construcción y desarmado de los prototipos. Para cada una de las etapas se utilizaron diferentes metodologías las cuales serán descritas a continuación.

#### 3.1. Definición y clasificación de Uniones

Lo primero fue la definición de las uniones carpinteras, entendiendo sus cualidades, piezas involucradas, funcionamientos, definiciones, geometrías y cortes necesarios. Para esto se realizó un catastro de las uniones carpinteras en base al seminario "Uniones Carpinteras" (Verdugo, 2020), y el libro "Uniones Carpinteras de Valparaíso" (Gonzalez & Maino, 2019), los cuales fueron los referentes más actualizados hasta la fecha del inicio de la investigación. Además, se conversó con

profesionales que trabajan en el ámbito de las uniones carpinteras para comprender en mayor profundidad el mundo y contexto de la carpintería de armar.

Posteriormente se clasificaron los factores que podrían haber afectado en la desarmabilidad de estas. Estos fueron: Proporcionalidad de las secciones, importancia de la geometría, tolerancia al estrés, importancia de las clavijas, entre otras. La elección de estas variables se dio en base a conocimiento aplicado previo a la investigación en construcciones de muebles en madera (ver Anexo 1: *Uniones Carpinteras*).

#### 3.2. Diseño de los prototipos y herramientas

Se diseñaron dos estructuras idénticas en pino radiata combinando secciones de 2x4' y 4x4'. Esto debido a que las secciones utilizadas en las iglesias de Chiloé rondan entre 5' a 8', y la sección más parecida disponible en el mercado eran de 4'.

La importancia del prototipo es la necesidad de poder experimentar directamente con las uniones carpinteras el efecto que tienen las variables señaladas en el objetivo principal: Periodicidad del desarmado, materialidad e incidencia de las clavijas. Por esto último ambas estructuras se diseñaron idénticos entre sí, pero difiriendo que en uno se contempló la utilización de clavijas y en el otro no. Esto para poder comparar el efecto que tienen estas al desarmarse múltiples veces las uniones. Las clavijas utilizadas se dividen en 2 tipos: tarugos (de 8 mm) y pernos (hilos de 8 mm para secciones pequeñas, y de 10 mm para secciones grandes). La utilización de ambos tipos de materiales también fue para comparar la desarmabilidad entre ellas.



**Fig.6:** Modelo 3D del prototipo "B". Elaboración propia

Posteriormente se definieron los tipos de uniones que se utilizaron para cada prototipo. Para decidir cuales se utilizarían, se comparó la geometría diseñada con el catastro de uniones realizado con anterioridad, y se optó por la unión que respondiera de mejor manera en cada una de las intersecciones.

**Tabla 1:** Tipos de Uniones y cantidades utilizadas. Elaboración propia

Tipo de Unión	Cantidad	Clavija (Solo en A)
Caja y espiga	8	No
Cola de milano	5	Si
Media cola de milano	3	Si
Cola de milano diagonal	8	Si
Ensamble de palma	4	No
Media madera en cruz	2	Si
Rayo de Júpiter	3	Si

### 3.3. Construcción y desarmado de prototipos.

Tras adquirir los materiales, se realizó una prueba de ensamble y empalme para decidir si hacer las piezas de manera individual o conseguir a un carpintero tradicional para construir las uniones. El resultado fue aceptable en comparación a las uniones estudiadas y visualizadas en la bibliografía, por lo que se decidió construir ambos prototipos de manera autónoma (ver Fig.7).

Para construir ambas estructuras y cortar las piezas se utilizaron las siguientes herramientas: Sierra ingleteadora, sierra eléctrica, serrucho, taladro, escofina, lijadora eléctrica, formones, caladoras, prensas e implementos de seguridad (ver Fig.8). Muchas de estas fueron utilizadas para facilitar el trabajo, pero aquellas que resultaron básicas y a su vez esenciales son el serrucho, el formón y un mazo.

Una vez cortadas todas las piezas, se realizaron dos formularios (uno para cada prototipo) para analizar diferentes factores del armado y desarmado de cada una de las uniones de los prototipos, y como estos van cambiando según la repetición de dicha acción. Los factores considerados a evaluar en fueron:

- **Apreciación del armado:** Del 1 "Las piezas entran solas" al 5 "Las piezas no encajan".
- **Apreciación del desarmado:** Del 1 "Las uniones se salen solas" al 5 "Las uniones no salen".

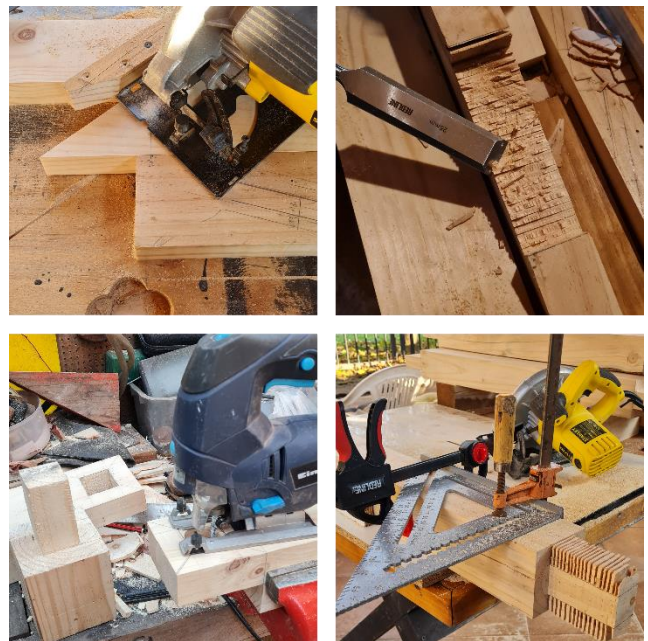
- **Apreciación de la tolerancia:** Del 1 "No existe espaciado alguno en la unión" al 5 "Existe espaciado en todos los sentidos de la unión".
- **Apreciación de la rotación:** Del 1 "Las piezas rotan en ningún sentido" al 5 "Las piezas rotan en todos los sentidos".
- **Apreciación de armado y desarmado de las clavijas:** Del 1 "Entran/salen solas con la mano" al 4 "Solo entran/salen con herramientas".

La decisión de crear escalas de apreciación en la toma de datos se debe a que tras repetir la acción de armado y desarmado, se debe evidenciar de manera clara los cambios ocurridos en cada unión.

Teniendo todos los preparativos para la última etapa listos, se definió el lugar donde se llevó a cabo el proceso de armado, desarmado y guardado. En este



**Fig.7:** Comparación unión carpintera de Valparaíso con unión de elaboración propia. Fuentes: "Uniones carpinteras de Valparaíso" (González & Maino, 2019); Elaboración propia.



**Fig.8:** Proceso de construcción del prototipo. Elaboración propia

caso se decidió por realizarse en un ambiente exterior y techado

Se armó el prototipo "A" (Uniones con clavijas) y el prototipo "B" (Uniones sin clavijas) dentro un área controlada de 2,5 m x 3.5 m. El área se debe marcar por un tema de seguridad, entendiendo que esta prueba con prototipos ocupa herramientas y acciones que, de ejecutarse de manera equivocada, podrían haber resultado dañinos tanto para personas como para las estructuras (ver Fig.9).

Una vez todo listo, se procedió con la evaluación y recolección de datos, la cual se dividió en 3 etapas: Etapa de armado, etapa de evaluación y etapa de desarmado.

En la etapa de armado se llenó la parte del formulario en torno a la "Apreciación de armado". La manera de realizarlo fue de unión a unión, partiendo por el prototipo A. Cuando las piezas no entraban con la mano, se utilizaba un mazo y un amortiguador para no marcar la madera. Una vez terminado el armado de las uniones, se procedió a llenar la parte de armado en la sección "Apreciación de las clavijas". Para las clavijas se utilizó un mazo (en el caso de los tarugos) y llaves (para los pernos). Una vez terminado el prototipo A se siguió con el "B" siguiendo los mismos pasos que ya se mencionaron.

La etapa siguiente fue la de evaluación, donde se inspeccionó la "Tolerancia y Rotación" de las uniones. Para la tolerancia se realizó una inspección visual buscando espaciados existentes en cada una de las uniones. Posteriormente se realizó la inspección de las rotaciones, para la cual se intentó desplazar las uniones mediante esfuerzos de tira y empuje en todas las direcciones en la que la unión trabajaba.

Ya en la etapa final de desarmado, se llenó la última parte del formulario. El proceso realizado aquí es el reverso del armado, por lo que lo primero en desarmarse y rellenarse en el formulario fueron las clavijas. Para los pernos se utilizaron las mismas llaves, pero para los tarugos se sumó un punzón, mediante el cual se empujaron los tarugos a través de las perforaciones. Una vez sacadas las clavijas, se procedió con las uniones, para las cuales se debió medir la resistencia de estas al momento de sacarlas. Para esto se midió la fuerza ocupada al momento de tirar la unión mediante la implementación de una pesa de mano y una cinta, y se anotó el resultado dependiendo de la marca máxima alcanzada antes de que la pieza cediera (ver Fig.10). La pesa de mano fue esencial para constatar cambios en la tolerancia de las piezas tras haber sido sometidas a varias

repeticiones de armado y desarmado. Una vez terminado el prototipo "A" se continuó con el "B" repitiendo los mismos procesos mencionados (ver Fig.11).

Una vez terminado el desarmado se guardaron las piezas en un ambiente interior, cerrado y controlado, para proteger las maderas de la humedad y temperaturas de la noche. Al día siguiente se repitió todo el proceso de armado, evaluación y desarmado hasta completar las 10 repeticiones

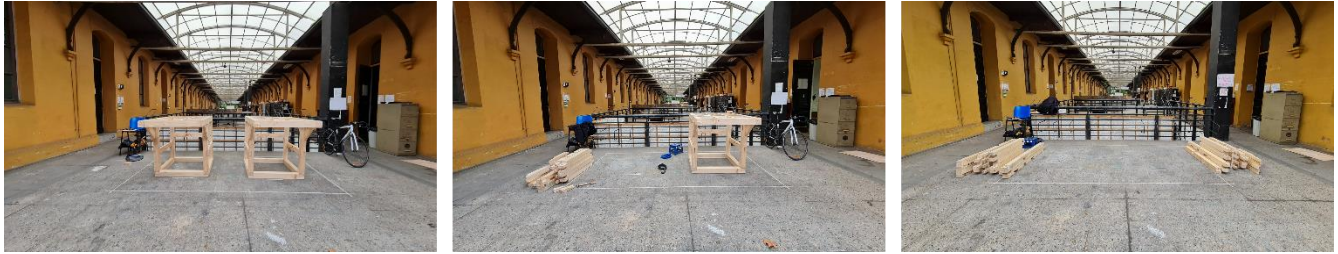
Cabe mencionar que la etapa de armado y desarmado sufrió modificaciones durante su proceso. Esto debido a que, llegado el primer día de experimentación, tras haber empezado a desarrollar el proceso, se observó que de llevarse a cabo la investigación tal y como estaba planeada, la recolección de datos resultaría ser una metodología engorrosa, poco ordenada y extremadamente extensa, por lo que lo diseñado para ser realizado en un periodo de una hora y media, resultó demorar más de tres horas.



**Fig.9:** Disposición de los prototipos en FAU. Fuente: Elaboración propia



**Fig.10:** Desarmado Unión A26 y utilización de pesa más cinta. Elaboración propia



**Fig.11:** Secuencia de desarmado de los prototipos. Elaboración propia

Debido a esto, llevar un registro fotográfico milimétrico de datos cuantitativos todos los días (como se tenía previsto en un inicio) hubiese resultado en una investigación que duraría meses. Se optó por cambiar entonces a un análisis de carácter cualitativo que permitiera reducir el tiempo necesario para completar la investigación.

## 4. Resultados

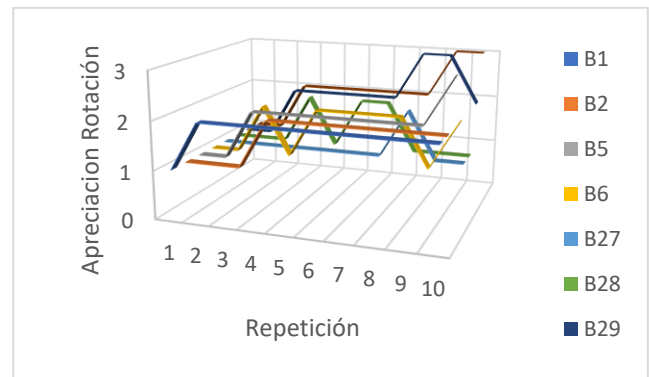
Tras dos semanas de armado y desarmado, debido a la cantidad de datos obtenidos resultó necesario separarla en 3 puntos distintos para su mejor entendimiento: Repetición, Clavijas y Materialidad.

### 4.1. Repetición

Ambos prototipos realizaron de manera exitosa 10 repeticiones de armado y desarmado. Esto demuestra que en efecto las uniones carpinteras son un sistema constructivo que puede ser considerado dentro de los principios de DfD.

Gran parte de las uniones presentan algún tipo de desgaste, si contamos de las 60 uniones totales entre ambos prototipos solo 15 uniones se mantuvieron dentro de los parámetros de desarmado con los que habían comenzado en un principio, y 10 de estas solo se desarmaban si se golpeaban con el mazo. Esto evidencia que las uniones carpinteras son un sistema constructivo que tiende a perder la tolerancia tras repetir varias veces el proceso de desarmado, y aquellas uniones que poseen un mayor margen de error (espaciado entre piezas), pierden más rápido la tolerancia que una con poco margen de error.

En relación con lo anterior los gráficos de la figura 12 evidencian como la unión de caja y espiga B30 mantuvo gran parte del proceso sus propiedades a un nivel constante, en contraposición a la unión de caja y espiga B1, la cual se va deteriorando rápidamente hasta llegar a los niveles mínimos (ver fig.13).



**Fig.12:** Gráfico desarmado unión Caja y espiga. Elaboración propia

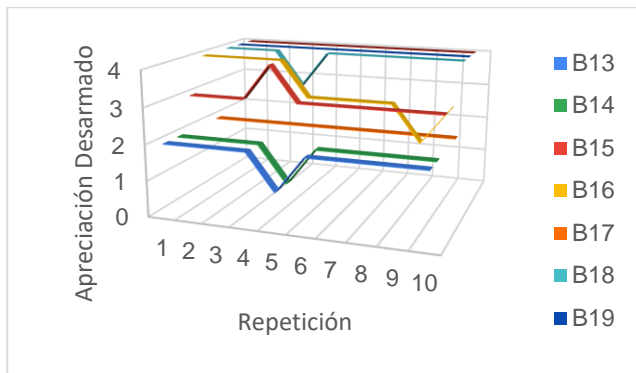


**Fig.13:** Comparación uniones de caja y espiga B1 y B30. Elaboración propia.

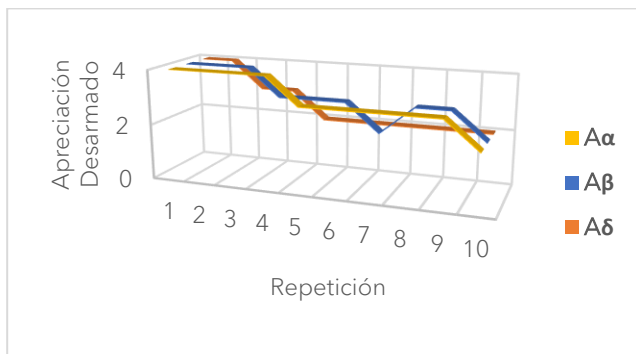


**Fig.14:** Daño estructural, Unión B3. Elaboración propia

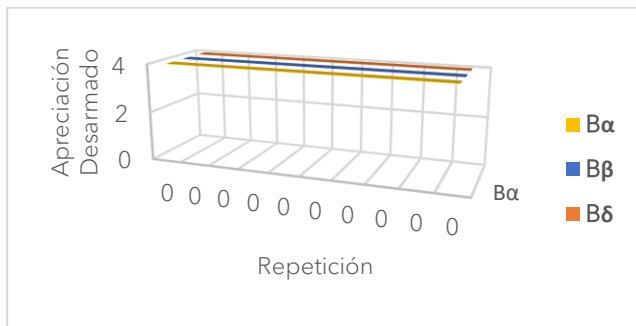




**Fig.15:** Gráfico desarmado unión Cola de milano diagonal. Elaboración propia.



**Fig.17:** Gráfico desarmado uniones A, Rayo de Júpiter. Elaboración propia.



**Fig.18:** Gráfico desarmado uniones B, Rayo de Júpiter. Elaboración propia.



**Fig.19:** Empalme rayo de Júpiter. Elaboración propia

Desde el primer día hasta el último, solo 1 de las 60 uniones se vio comprometida, la B3. Esto se debió principalmente a un error de diseño más que de la unión misma, pero es importante también entender que el motivo por la cual se rompió es a la desproporción entre cola de milano y contra cola de milano (ver Fig.14).

En cuanto a las uniones mismas, se observó que existen uniones que son más propensas a la pérdida de su tolerancia, como es el caso de las caja y espiga, las cuales mostraron ser la unión que se vio más comprometida a lo largo del proceso. En contra parte la unión que demostró ser más estable entorno a su tolerancia fue la cola de milano en diagonal (ver Fig. 12 y 15). Esto se puede explicar de dos maneras distintas.

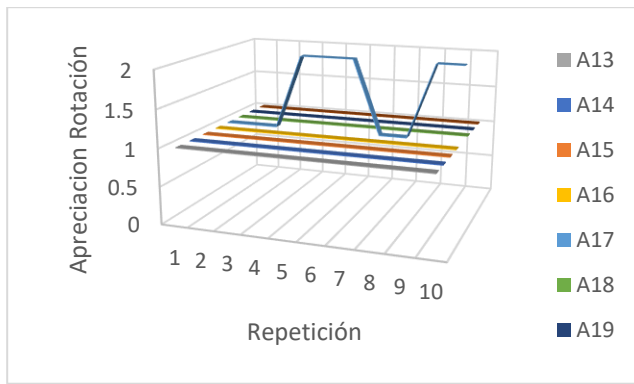
Lo primero es debido a que la caja y espiga se encuentran en una posición de la estructura mucho más externa, de hecho, es sobre la cual se basa la estructura principal del prototipo, por lo que recibe mucho más cargas y esfuerzos que una unión secundaria como la cola de milano diagonal. Lo segundo tiene que ver con la cantidad de piezas involucradas, ya que, en comparación con las 3 piezas involucradas en la caja y espiga, en la cola de milano solo intervienen 2.

también se observó que, en comparación al inicio de la investigación, al final gran parte de las uniones presentaban daños externos producidos por el uso de las herramientas. Si bien no presentan un daño estructural como tal, si afecta en la percepción que se tiene sobre las piezas.

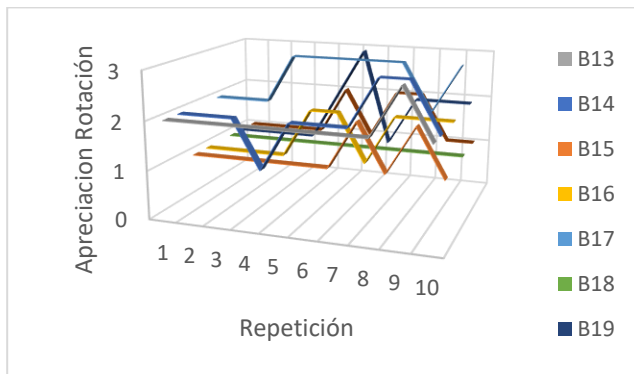
## 4.2. Clavijas

Las clavijas (tanto tarugos como pernos) demostraron ser un factor importante que considerar dentro de la desarmabilidad de las uniones, ya que al comparar las uniones el prototipo A con el prototipo B, mostraron tener un desgaste mayor en aquellas uniones que presentaban clavijas, acentuándose este fenómeno principalmente en los empalmes. Las uniones  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\delta$  (Correspondientes al Rayo de Júpiter), se desgastaron mucho más rápido en el prototipo con clavijas (ver Fig.17 y 18).

Esta situación se dio de manera más drástica cuando las clavijas utilizadas eran únicamente pernos ( $A\delta$ ) que llega a sus valores mínimos en el tercer día, en cambio los empalmes del prototipo B, se mantuvieron firmes hasta el final del proceso. Esto nos dice que estas están diseñadas de tal manera que la suma de una fuerza extra dentro de la misma



**Fig.20:** Gráfico rotaciones unión Cola de milano diagonal A. Elaboración propia.



**Fig.21:** Gráfico rotaciones unión Cola de milano diagonal. Elaboración propia



**Fig.22:** Daño por perno en Unión Media cola de milano, B23. Fuente: Elaboración propia.

unión provoca un desgaste o una deformación mucho más rápida.

En cuanto a las rotaciones, casi la totalidad de las uniones del prototipo A mantuvieron sus desplazamientos al mínimo (ver Fig.20), en contraste con el bajo desempeño que demostraron las

uniones del prototipo B, donde la mayoría de estas mostraron un aumento constante en la cantidad de sentidos en los que se podían desplazar (ver. Fig21). Esto se puede entender desde el hecho de que la clavija es un elemento externo que atraviesa la unión de manera transversal a los sentidos en los que naturalmente trabajaría la unión, entregando estabilidad y rigidez estructural.

Comparando pernos y tarugos, se pudo observar que pernos mostraron ser mucho más eficientes al momento de armar y desarmar. Los tarugos demostraron que también son desarmables, pero estos fueron perdiendo firmeza con el paso del tiempo. Esto se puede explicar debido a que los tarugos son una clavija que trabaja 100% a presión y fricción. En su contra parte, los pernos no perdieron firmeza en ningún momento, además de ser fáciles de insertar y sacar.

El único beneficio que mostró tener el tarugo, y que no tiene el perno, es que este no deja marcas en la madera. Debido a que el perno es de un material más duro que la madera (acero), la presión que ejerce sobre la madera de pino deja una marca bastante notoria una vez se retira. Dependiendo de la presión con la que se apriete, puede llegar a reventar la madera. En la medida que la madera que se ocupe sea más dura, menos marcas va a dejar (ver Fig.22).

### 4.3. Materialidad

El pino radiata mostro ser un material apto para crear uniones carpinteras con maderas de secciones 2x4', 4x4'. Si bien se esperaba que estas no permitieran hacer uniones más complejas como la cola de milano diagonal, mostraron ser bastante maleables al momento de cortar las piezas.

De hecho, donde más afectó el tema de la materialidad en los prototipos fue en su construcción. Durante el proceso de cortado de las uniones, era bastante fácil que se astillaran las fibras si se cortaban en contra de su crecimiento, y esta venía con varias grietas que podrían haber terminado en daños estructurales graves. Hasta el final del proceso ninguna de estas grietas comprometió la integridad estructural de los prototipos, pero además aparecieron otras más pequeñas que posiblemente en un futuro podrían afectar las propiedades estructurales.

Durante el transcurso de las dos semanas dispuestas para la toma de datos, hubo días en los que inevitablemente la humedad relativa supero el 80%. Este factor terminó por no influir debido a que la

exposición de la estructura a la humedad nunca fue continua, y se controlaba al momento de guardarlo en un espacio seco y cerrado.

**Tabla 2:** Humedad relativa durante las semanas. Información extraída de MeteoBlue, Mes de Junio.

	L	M	M	J	V
Semana 1	75%	90%	70%	75%	65%
Semana 2	75%	65%	80%	75%	60%

## 5. Conclusiones

Mediante la presente investigación entonces se pudieron comprobar y profundizar en los puntos mencionados al principio de esta investigación.

Lo primero tiene que ver con que las uniones carpinteras son un sistema que se puede armar y desarmar repetidas veces, posiblemente más de 10 veces ya que al final del proceso, existían unas cuantas uniones que todavía mantenían la tolerancia en el desarmado.

Además, estas también son reproducibles en maderas no nativas, como es en este caso el pino radiata. La única dificultad que se le podría atribuir a este factor es el hecho de que la construcción y elaboración de las uniones, puede ser bastante complicado y extenso si no poseen las herramientas adecuadas.

Sumado a lo anterior, también se demostró que es factible replicar las mismas uniones utilizadas en Chiloé y Valparaíso a una menor escala. Las 4' pulgadas contrastaban fuertemente con las 8' pulgadas, pero respondieron de manera muy similar a lo descrito en la literatura.

Y por último las clavijas afectan tanto positivamente como negativamente a la desarmabilidad de las uniones carpinteras. Estas son un factor importante a tener en cuenta en el desgaste acelerado de las uniones como tal, en especial en empalmes, pero a su vez entregan estabilidad e impiden rotaciones en caso de que las uniones se encuentren flojas. Comparando tarugos con pernos se puede concluir que la clavija más amigable con el desarmado de estructuras es el perno, debido a lo eficiente y constante que puede llegar a ser su desarmado.

Con un tiempo más extenso dedicado a la experimentación, un número mayor de repeticiones, con una mano de obra más calificada que la propia y contando con herramientas de mayor precisión, se podría haber llegado a con mayor claridad y velocidad a resultados más específicos y de mayor profundidad, o incluso podrían estudiarse otras variables que afecten la desarmabilidad, como por ejemplo el comportamiento de estructuras en madera a constantes cambios de humedad.

## 6. Agradecimientos

Quisiera agradecer a Felipe López por haberme guiado y aconsejado a lo largo del desarrollo del seminario, las conversaciones y opiniones intercambiadas con Luis Goldsack, Felipe González, Pedro Mirauda, Bruno Bueno, y todas aquellas personas que aportaron al desarrollo de esta investigación.

## Referencias

- Akinade, O., Oyedele, L., Ajayi, S., Bilal, M., Alaka, H., Owolabi, H., . . . Kaidiri, K. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. *Waste Management*, 3-31.
- Almonacid, M. (2019). *Restauracion Iglesias Patrimoniales de Chiloé*. Obtenido de Madera21: <https://www.madera21.cl/wp-content/uploads/2019/10/Macarena-Almonacid.pdf>
- Almonacid, M., & Medina, O. (2014). Iglesia de Rilán: indicios de prefabricación en la Escuela Chilota de arquitectura en madera. *Revista de Arquitectura*, 12-18.
- Banco Mundial. (2020). *La construcción de viviendas en madera en Chile: Un pilar para el desarrollo sostenible y la agenda de reactivación*.
- Berg, L. (2007). Restauración en Chiloé (Chile): La Iglesia de Castro. *APUNTES*, 159-167.
- Circulaire Boweconomie. (2018). *Circular Construction Economy*. Utrecht.

- Climont, A. (2020). Economía circular aplicada a la Arquitectura: Espejismo o Realidad. *LIMAQ*, 29-71.
- Comision Nacional del Medio Ambiente. (2010). *PRIMER REPORTE SOBRE MANEJO DE RESIDUOS SOLIDOS EN CHILE*. Santiago.
- Convenio Interministerial Construcción Sustentable. (2020). *Hoja de Ruta RCD*. Obtenido de Construye 2025: <http://construye2025.cl/rcd/hoja-de-ruta/>
- Cutieru, A. (Julio de 2020). *A guide to Design for Dissassembly*. Obtenido de ArchDaily: <https://www.archdaily.com/943366/a-guide-to-design-for-disassembly>
- Cutieru, A. (06 de Octubre de 2021). *Spacelab's Experimental Shelter is Energy Self-Sufficient and Designed for Disassembly*. Obtenido de Archdaily: <https://www.archdaily.com/969647/space-labs-experimental-shelter-is-energy-self-sufficient-and-designed-for-disassembly>
- Cutieru, A. (06 de Octubre de 2021). *Spacelab's Experimental Shelter is Energy Self-Sufficient and Designed for Disassembly*. Obtenido de Archdaily: <https://www.archdaily.com/969647/space-labs-experimental-shelter-is-energy-self-sufficient-and-designed-for-disassembly>
- Ellen Macarthur Foundation. (2021). *Circular Economy Introduction*. Obtenido de <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- EPA Region U. (11 de 2015). DESIGN FOR DECONSTRUCTION. Estados Unidos.
- Felmer, G., Morales-Vera, R., Salgado, P., Astroza, R., Gonzalez, I., Tobar, J., . . . Wishnie, M. (2021). A Life Cycle Assesment of Low-Energy Residential Multistory Mass-Timber Buildings in Central Chile. *WTCE 2021- World Conference on Timber Engineering*.
- Fuentes, J., Mattei, R., Sánchez, M., & Velásquez, J. (2021). Uniones Carpinteras. Facultad de Arquitectura de la Universidad de Chile.
- Gonzalez, L. F., & Maino, S. (2019). *Uniones Carpinteras de Valparaiso*. Valparaiso: RIL editores.
- Kanter, J. (2018). Design for Deconstruction in the design process: State of Art. *Buildings*, 8.
- Luhás, J., Mikkilá, M., Kyllihati, E., Miettinen, J., Malkamaki, A., Patari, S., . . . Toppinen, A. (2021). Pathways to a forest-based bioeconomy in 2060 within policy targets on climate changes mitigation and biodiversity protection. *Science Direct*, 1-11.
- Mercado, L. (2020). *Economía circluar en la arquitectura: Cómo proyectar de manera circular*. Vallalodid: Universidad de Vallalodid. Escuela técnica superior de Arquitectura.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (12 de 11 de 2021). *Ministro Felipe Ward presenta en la COP26 estrategias del Minvu para el desarrollo de ciudades resilientes al 2050*. Obtenido de MINVU: <https://www.minvu.gob.cl/noticia/noticias/ministro-felipe-ward-presenta-en-la-cop26-estrategia-del-minvu-para-el-desarrollo-de-ciudades-resilientes-al-2050/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). *Informe del Estado del Medio Ambiente*. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente.
- Morel, J.-C., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Becket, C., & Bao Bui, Q. (2021). Earth as construction material in the circular economy context: Practitioner perspectives on barriers to overcome. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1834).

- Naciones Unidas. (2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Santiago.
- Quitral, F. J., González, L. F., García, R., & Martínez, A. (2020). Workflow for a Timber Joinery Robotics. *XXIV International Conferences of the Iberoamerican Society of Digital Graphics*, 291-296.
- RESPACE. (2019). *Werkspoorfabriek / Utrecht*. Obtenido de Respace: <https://www.respace.nl/portfolio/werkspoorfabriek/>
- Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). 2015. *Procedia Engineering*, 1296-1304.
- Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities. *Procedia Engineering*, 1296-1304.
- RotorDC. (2021). *Rotor Deconstruction / Consulting*. Obtenido de <https://rotordc.com/>
- Segura, A., Rojas, L., & Pulido, Y. (14 de 05 de 2020). Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos. *Revista ESPACIOS*, 41(17), 22.
- Sthaer, W., & MacArhtur, E. (2019). *The Circular Economy: A user's guide*. London: Routledge.
- Sumiyoshi, T., & Matsui, G. (1989). *Wood Joints in Classical Japanese Architecture*. Japón: Kajima Institute Publishing.
- The Exploded View Beyond Building. (2021). *RESPACE*. Obtenido de RESPACE: <https://theexplodedview.com/methodbb/respace/>
- The Exploded View Beyond Buildings. (2021). *Respace*. Obtenido de The Exploded View: <https://theexplodedview.com/methodbb/respace/>
- Verdugo, V. (2020). Uniones Carpinteras - Tradición, técnica y cultura de un Oficio. *Seminario*. Santiago, Chile.
- Verdugo, V. (2021). DES-ARMAR: Rescate patrimonial a partir de un sistema de piezas y componentes. *Revista de Arquitectura*, 69-79.
- WTCE. (2021). *World Conference on Timber Engineering 2021 Santiago de Chile*. Obtenido de <http://wcte2021.com/>

## Anexos

**Anexo 1:** Uniones Carpinteras.

**Anexo 2:** Registro fotográfico del proceso.

**Anexo 3:** Tabla de resultados y gráficos realizados.

**Anexo 4:** Formularios para toma de datos:

- Prototipo A: <https://forms.gle/Jj7Xnik2ZY1vTpG7A>
- Prototipo B: <https://forms.gle/shFKhWmUfSjhBjQp8>

Los anexos 1, 2 y 3 se encuentran en la carpeta web:

<https://drive.google.com/drive/folders/1RtsMil9awvJVAyuXnHCs7Z0TeFJF48fW?usp=sharing>