

CONSTRUCTIVIDAD DE LAS UNIONES CARPINTERAS

FABRICADAS DIGITALMENTE PARA LA EDIFICACIÓN EN MEDIANA ALTURA

Realizado por:

Diego Jiménez Gutiérrez

Tutorizado por:

Cristian Muñoz Díaz

Asignatura:

Seminario de licenciatura: tecnología 2021

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Universidad de Chile



Agradecimientos

A quienes me entregaron apoyo y motivación a lo largo de este proceso, al profesor, a mi familia y amigos.

RESUMEN

La construcción en madera en altura ha evolucionado de gran forma en las últimas dos décadas debido a las búsquedas de métodos con menor impacto ambiental frente a materiales tradicionales. En las estructuras en madera dependen en gran medida de las uniones de acero, por esto surge el interés por construir en madera sin necesidad de otros materiales.

Ante esto se plantea que las herramientas de fabricación digital remedian problemas de constructividad de la técnica de uniones carpinteras, convirtiéndolas en una solución pertinente en el contexto actual.

Las herramientas contemporáneas aumentan la constructividad de la técnica al mejorar la productividad, rapidez, precisión, entre otros volviendo a considerarla una solución factible.

INTRODUCCIÓN

Las herramientas influyeron sobre nuestra capacidad al transformarse en una extensión de nuestro cuerpo, pasando desde las manuales como los cuchillos de madera, hasta las contemporáneas como los brazos robóticos. Entre ellos existe una diferencia de miles de años, pero la existencia de una no se da sin la otra.

A lo largo de la historia las herramientas no son inocentes y han guiado nuestra relación con los materiales y por ende los desarrollos tecnológicos. Desde su existencia nos han facilitado el utilizar los materiales de nuestro entorno, permitiendo darles formas a gusto. Así surgieron avances tecnológicos que nos llevaron de pequeñas edificaciones con piedras hasta llegar a edificios de 300 metros de altura.

Actualmente la construcción pasa por una revolución de la madera en la cual busca alcanzar la mayor altura posibilitada por las tecnologías disponibles, pero existen ciertos aspectos arquitectónicos donde las uniones de acero aun no logran integrarse del todo. Por esto surge el interés de revisar una antigua técnica de uniones carpinteras ofreciendo una alternativa a esta inquietud. En este punto la fabricación con herramientas artesanales quita méritos a la técnica por lo que se plantea que, desde las herramientas contemporáneas, permiten volver a considerarla una solución pertinente.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La constante evolución del contexto ha llevado a cambiar continuamente los criterios que definen los medios de fabricación y producción.

Actualmente la construcción es responsable de un 40% de la contaminación (Gasca Alonso, 2021) y por ello la madera ha visto su renacer debido a las propiedades de sustentabilidad (carbono negativo) junto con que el desarrollo de nuevos productos en madera ha otorgado posibilidades arquitectónicas que antes no existían (Green, 2017) mediante materiales basados en ella como la madera laminada encolada (MLE), paneles de madera contralaminada (CLT) entre otros, generando en este momento una revolución en la construcción (Landa, 2017).

Actualmente se da un gran avance en la construcción en madera en altura, pero estas siguen dependiendo en gran medida de las uniones de acero. Por esto surge el interés de construir en madera sin la necesidad de otros materiales.

Ante esta situación se propone una revisión sobre cómo las herramientas han permitido la evolución del diseño en las uniones carpinteras beneficiando la constructividad que entregan para volver a considerar antiguas técnicas como válidas en el contexto contemporáneo.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Las herramientas de fabricación digital entregan ventajas respecto a las herramientas artesanales, produciendo un cambio dentro del proceso de fabricación que afecta el producto, por esto es relevante plantear la siguiente pregunta de investigación.

¿De qué manera las herramientas contemporáneas de fabricación digital favorecen la constructividad de las uniones carpinteras para edificaciones de media altura?

OBJETIVO

Determinar los aspectos asociados a constructividad que son mejorables a partir de las herramientas contemporáneas.

Objetivo específico

Comparar el grado de constructividad entre las herramientas de fabricación tradicional y contemporánea.

HIPÓTESIS

Las herramientas de fabricación ofrecen características diferentes a las artesanales, la incorporación de estas aumentan el grado de constructividad de las uniones carpinteras, permitiendo volver a considerarlas como una opción válida al cumplir con los requisitos contemporáneos.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La investigación se basa en la revisión de datos bibliográficos, posteriormente se comparan los resultados mediante fichas definidas según un aspecto asociado a constructividad considerado pertinente desde el punto de vista de las herramientas.

MARCO TEÓRICO

1) Construcción en altura

La edificación en altura en madera surge en un contexto donde “el impacto ambiental mundial de los edificios data del 20% del consumo de agua, entre el 25 y el 40% del uso de energía, entre el 30 y 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero y entre el 25 y el 40% de la generación de residuos sólidos.” (Gasca Alonso, 2021). Esto ha generado que se busquen materiales que puedan reducir las emisiones de carbono y formas de almacenar el carbono, así se revaloriza la madera debido a que cumple con ambas (Green, 2017).

Las estrategias implementadas en los países con mayor desarrollo en construcción en altura en madera se dan debido a avances tecnológicos desarrollados por los recursos disponibles, los avances normativos que permiten una reglamentación apropiada para usar este material y el impulso mediante políticas para un cambio cultural sobre la construcción en este material (Quintanilla Moreno & Goldsack Jarpa, 2018).

Construir con madera en altura no es nuevo, una edificación del año 711 aún se mantiene en pie, me refiero a la pagoda de Hoyuji en Nara, Japón (Imagen 1) de 5 pisos que alcanza los 32,55 metros de altura (Mateo Carmona, 2020), pero los resultados de los nuevos materiales en base a madera son estructuras de mayor altura y complejidad como por ejemplo el edificio Mjøstårnet en Noruega (Imagen 2) que es el más alto en madera. Este alcanza los 85,4 metros donde las uniones en su sistema estructural son placas de acero ranuradas y tacos (Abrahamsen, 2017).



Imagen 1 |

Pagoda de Hoyuji, Japón



Imagen 2|

Mjøstårnet, Noruega.

Respecto al tema de las uniones Pierre Blanchet considera que los conectores de acero son un punto débil dentro de la estructura debido a la pérdida de continuidad y la seguridad en caso de incendio, por otro lado tampoco se han logrado integrarse a los conceptos arquitectónicos (2017). Como contrapunto a esta situación se muestra el ejemplo del edificio de oficinas Tamedia en Suiza (Imagen 3) de 7 pisos diseñado por Shigeru Ban donde, tanto los elementos de poste y viga como las uniones, son puramente de madera (Ban, 2017).



Imagen 3|

Oficinas Tamedia durante proceso de construcción.

La construcción en madera ha avanzado de gran forma las últimas décadas, pero para poder evolucionar se requiere un gran número de desarrollos en aspectos técnicos referenciados a como los entramados son montados y sus uniones (Blanchet, 2017).

Entendiendo que en las estructuras de madera el progreso en cuanto a lo constructivo está relacionado directamente con el desarrollo tecnológico de las uniones (Argüelles Alvarez, 2010), es que debe existir un interés por ir más allá de los conectores metálicos o clavos y ofrecer opciones con encuentros ocultos como clavijas encoladas o uniones en madera-madera (Blanchet, 2017). En este último punto aparece la técnica de uniones

carpinteras como una solución sustentable (González Böhme & Maino Ansaldo, 2019) pero que deben resolverse sus problemas de constructividad para que sea considerada una solución pertinente en el contexto contemporáneo, por esto se realiza una revisión de cómo las herramientas afectan el grado de constructividad de la técnica de uniones carpinteras en el proceso de fabricación.

2) Técnica de uniones carpinteras.

La forma de unir los elementos de madera ha definido arquitecturas posibles, así el tipo de desarrollo de uniones como nudos, clavos y ensamblajes han significado una evolución de las tipologías estructurales (Landa, 2017) que varían según el contexto y sus imposiciones frente a lo que se requiere entorno a la constructividad propia de las uniones carpinteras (Erman, 2002) como se revisará más adelante.

La carpintería de armar es un conocimiento ancestral que, en general, se trata de entramados de madera de grandes dimensiones con complejas uniones ensambladas (Cherubini Zanetel, 2019) basada en la prefabricación en taller o en obra, para formar un continuo resistente (González Böhme & Maino Ansaldo, 2019). La prefabricación de las piezas logra que los elementos estructurales puedan ser ajustados en obra a través de un sistema lógico mediante el uso de ensamblajes (Berg Costa, 2015). Este sistema depende de la geometría que dé el carpintero de armar a cada unión para que calcen con precisión exacta, así el entramado transmite sus cargas mediante contacto y fricción de un

elemento a otro hasta disiparlas en el piso (González Böhme & Maino Ansaldo, 2019).

Entre los ensamblajes utilizados en este sistema se dan la caja y espiga, media madera, cola de Milán, rayo de Júpiter entre otros (Berg Costa, 2015) (Cherubini Zanetel, 2019), esta técnica de unión utiliza elementos como los clavos o tarugos solo para refuerzo (González Böhme & Maino Ansaldo, 2019), y en algunos casos casi no existe su uso como lo sucedido en las iglesias de Chiloé que, algunas contando con torres que alcanzan los 40 metros de altura y a pesar de los años, han resistido vientos de 100km/h y sismos entre 8 y 9 en escala Richter (Berg Costa, 2015).

Este sistema basado en uniones carpinteras que utilizaba elementos como tarugos o, en algunos casos, clavos metálicos solo eran como refuerzo, pero debido a la llegada de nuevos métodos constructivos como el *Balloon frame* y *Plataform frame*, basados en uniones mediante clavos y conectores metálicos, llevó al reemplazo debido a que estos ofrecían rapidez, disminución de costos y requería carpinteros menos especializados (Verdugo Bascuñán, 2021).

Los altos costos del sistema de uniones carpinteras fueron reemplazados por la eficiencia y economía de un sistema basado en clavos, el trabajo realizado por 20 personas, con el nuevo sistema, podía ser realizado por dos (Montecinos Barrientos, Salinas Jaque, & Basaez Yau, 1981). De este modo la técnica no tuvo oportunidad de continuar evolucionando junto con las nuevas tecnologías, por lo que no se experimentaron nuevas soluciones con este sistema (Verdugo Bascuñán, 2021).

En la actualidad el conocimiento ancestral de esta técnica se está perdiendo debido al uso de uniones metálicas (Erman, 2002) y al desuso de uniones carpinteras y junto con esto la pérdida de mano de obra calificada (González Böhme & Maino Ansaldo, 2019)

3) Concepto de constructividad

“El concepto de constructividad describe el grado en el cual un determinado diseño facilita su construcción, sujeto a todos los requerimientos del cliente y del proyecto. Un diseño con **un alto grado de constructividad es aquel que toma en cuenta las particularidades de los procesos constructivos y permite desarrollar obras más rápidas, eficientes, y seguras.** Por el contrario, un diseño con un bajo grado de constructividad es aquel que tiene características que obligan a tener faenas más difíciles, ineficientes o inseguras.” (Loyola Vergara & Goldsack Jarpa, 2011). Así se entiende a las herramientas no como un simple objeto con el fin de una tarea, sino como parte importante dentro del proceso que va a condicionar la fabricación que tengan los productos (Macfarlane, 2003) y, por lo tanto, afectar el grado de constructividad de la técnica empleada. El termino se relaciona con la integración de los conocimientos y la experiencia en construcción dentro de las fases del proyecto apuntando a objetivos generales y la factibilidad de la construcción (Wong, Lam, Chan, & Shen, 2007).

Según la definición anterior se da que el criterio contemporáneo apunta a una mirada holística en la que el diseño

depende en gran medida en cómo se integran los procesos constructivos, por eso las herramientas de fabricación digital son importantes, ya que entregan mayor precisión para desarrollar y llevar a cabo diseños con mayor eficacia, eficiencia y rapidez dotando así de mayor constructividad que la otorgada por las artesanales.

Dentro del libro Constructividad y arquitectura de Mauricio Loyola y Luis Goldsack se mencionan que son 22 los aspectos relacionados a constructividad dentro de un proceso de construcción. La investigación se centra en las herramientas principalmente pero también se menciona a la prefabricación, la estandarización, la mano de obra, entre otros como aspectos que interactúan con el de herramientas afectando la constructividad propia del proceso de fabricación, producto y por ende la técnica.

El termino herramienta según Loyola y Goldsack “Se refiere a la consideración de las características específicas de las herramientas que deban ser utilizadas en las faenas en terreno, tales como límites técnicos de trabajo, nivel de disponibilidad, exigencia de capacitación para su uso, etc.” (2010), apuntando como se mencionaba anteriormente no solo a la tarea desarrollada por la herramienta, sino a como esta es parte de un proceso de fabricación que va a cambiar, en este caso, no la técnica en sí sino la manera de labrar las uniones.

4) Herramientas

La herramienta es una parte innegable del producto (Macfarlane, 2003), estas son una extensión de las manos que expanden las facultades humanas y

guían nuestras acciones y pensamiento (Pallasmaa, 2011), un ejemplo que menciona Juhani Pallasmaa en su libro *La mano que piensa* para evidenciar esta idea es entender que, dibujar un proyecto de arquitectura con un lápiz, un mouse o un carboncillo y que estos sean intercambiables, es tener un concepto errado sobre la unión de la mano, herramienta y mente (2011). Esto da a comprender que las herramientas ayudan a mantener una relación con las técnicas y lo que implica, en este caso el material, formando un conocimiento tácito junto con destreza. Por otro lado, las máquinas industriales ayudan a repetir tareas para obtener un producto de forma inmediata dejando de lado la destreza (Sennett, 2013) y por lo tanto cambian la manera de construir conocimiento, que era el basado en la iteración de tareas y la conexión entre la mano, herramienta y mente.

En el libro *Artesanía, tecnología y nuevas formas de trabajo* Richard Sennett menciona que las herramientas aparecen con gran anterioridad frente a que se conozca el cómo utilizarlas y por ende entender las ventajas que otorga al proceso de fabricación (2013). Para argumentar lo anterior da el ejemplo de la introducción de la piedra giratoria en donde se colocaba la masa de arcilla en el mundo de la alfarería, donde la posibilidad de dar nuevas formas al barro revolucionó el área, pero este cambio solo se posibilitó después de varios siglos de lenta evolución sobre cómo aprender a usar la herramienta (Sennett, 2013). Esto lleva a revisar de qué forma las herramientas han evolucionado junto con el contexto y cuáles son las ventajas y desventajas que ofrecen en un proceso de fabricación.

5) Breve contextualización sobre las herramientas

En el mundo se han diseñado más de 1000 tipos de uniones carpinteras y sus variaciones (Erman, 2002) en donde los carpinteros durante siglos se basaron en sus conocimientos y habilidades sin tener conocimiento sobre los esfuerzos que debían soportar ni las cargas que recibían (Argüelles Alvarez, 2010). Entre estas se destacan las japonesas debido a los intrincados cortes que poseen, pero esta acentuación tiene un trasfondo mayor en donde el contexto y sus exigencias de producción, tanto en el occidente como en oriente, llevaron al desarrollo de herramientas con disímiles fines (Erman, 2002).

Los diferentes contextos donde se desarrollan las herramientas marcan la evolución de esta y su relación entre estos dos puntos, herramienta y contexto (Pallasmaa, 2011). Según lo mencionado anteriormente en occidente se dio un enfoque centrado en la producción en masa con mayor velocidad, la variedad de herramientas disponibles en el siglo XX eran un total de 80 contando las eléctricas, estas eran robustas, grandes y pesadas en comparación con las de oriente, se basaban en el uso de la fuerza pero a su vez eran prácticas, fáciles de usar y eficientes (Erman, 2002). Por otro lado, en oriente se encontraban diseñadas, más que para el uso de la fuerza, para la precisión y el uso sensible relacionadas con las habilidades manuales y mentales del artesano, debido a esta influencia cultural y enfoque distinto de la fabricación es que se contaba un total de 180 herramientas (Heesterman & Sweet, 2018), de entre ellas 49 eran solo tipos diferentes de cinceles (Erman, 2002).

La búsqueda de mayor producción y eficiencia a costos más económicos produjo que la estandarización y producción en masa estuviese por sobre la producción artesanal en el occidente, en cambio en oriente se vio a la tecnología para el desarrollo en masa solo como un instrumento al servicio por lo que se continuo con los principios tradicionales (Erman, 2002). El fin con que aparecen las herramientas va en relación con los cambios en los criterios de fabricación que impone el contexto y que a su vez tiene relación directa con el producto final en cuanto a las factibilidades del diseño en las uniones.

6) Breve contextualización de sistema constructivo en madera en el sur de Chile

La construcción en madera se encuentra dividida en diferentes corrientes, en el norte y centro es en su mayor parte norteamericana y británica, mientras que en el sur alemana (González Böhme & Maino Ansaldo, 2019). El principal desarrollo en la técnica constructiva se dio en el sur por los avances constructivos introducidos por los colonos, por lo que es la zona a considerar relevante.

Antes de la llegada de los colonos se tenía un bajo conocimiento respecto a la construcción en madera siendo que la zona contaba con una gran cantidad de artilleros y disponibilidad material (Tillería González & Vela Cossío, 2017). Las herramientas con las que se disponían eran principalmente el hacha y algunos tipos de cepillos, aunque si bien en la expulsión de los jesuitas en 1767 poseían una gran variedad de herramientas entre ellas “serruchos de

una y dos manos, cepillos, formones y gubias, limas, martillos, gramiles, guillames, escoplos, acanaladores, hachas, azuelas, barrenos, fierros de tornear, junteras (seguramente prensas), etc. (Vásquez de Acuña, 1956), pero ningún instrumento de medidas” (Berg Costa, 2015), se da por entendido que las sabían utilizar pero como su misión era evangelizar no se esparció ampliamente su conocimiento, siendo los colonos alemanes quienes impulsaron el sistema constructivo basado en entramados de madera (Berg Costa, 2015).

Con la llegada de los alemanes y la importación de nuevas técnicas constructivas junto con herramientas que eran desconocidas para los locales (Berg Costa, 2015) ampliando la construcción en madera. El sistema constructivo importado era el *fachwerk*, el cual consta de un entramado de madera que mediante intrincados cortes en los elementos se forman uniones que permiten conectar todo el sistema y formar un continuo estructural resistente (González Böhme & Maino Ansaldo, 2019), similar al *plataform frame* (Cherubini Zanetel, 2019).

Para poder fabricar los cortes requeridos por las uniones se necesitaban al menos 5 tipos de herramientas, entre ellas “serruchos y cierras para cortar; hachas de mano y azuelas para desbastar la madera; los escoplos y formones para hacer las cajas y cortes donde no cabe otra herramienta de corte; los martillos y masas para golpear y producir precisión en los cortes con escoplos; y finalmente los barrenos y taladros que permiten la perforación para colocar los tarugos.” (Cherubini Zanetel, 2019), debido a la baja disponibilidad de estas fue que los carpinteros locales aprendices de los maestros alemanes, al independizarse

de ellos, debieron de fabricar sus propias herramientas (Berg Costa, 2015).

La amplia difusión del sistema constructivo se debió al rápido aprendizaje de los pupilos, los cuales adquirirían el conocimiento de forma distinta a como lo hicieron los maestros carpinteros alemanes (Cherubini Zanetel, 2019). Estos últimos contaban con una fuerte formación de conocimiento tanto teórico como práctico ya que habían pasado por un proceso de aprendizaje formal. La etapa de formación constaba de la asistencia a una escuela de carpinteros donde aprendían sobre las herramientas de medición y diferentes técnicas para ejecutar en obra, después de pasar por diferentes etapas de estudios se medían sus habilidades prácticas y conocimientos teóricos mediante pruebas para optar al título de *Zimmerman* (carpintero) o posteriormente al grado mayor de *Zimmermeister* (maestro carpintero) (Cherubini Zanetel, 2019).

Un proceso diferente se dio con los carpinteros locales, los cuales mediante la iteración de las tareas en obra guiadas, pero trabajando a la par, por el maestro carpintero durante el proceso constructivo les sirvió para adquirir el conocimiento y habilidades hasta en cierto punto llegar a independizarse de su tutor (Cherubini Zanetel, 2019), así la calidad de las uniones dependen principalmente de la habilidad y experiencia del carpintero (Tang & Chilton, 2019).

El sistema constructivo basado en el entramado de madera tuvo gran difusión en la zona y a la vez se desarrollaron estructuras de gran envergadura. Desde la arquitectura residencial hasta la religiosa se construían con la misma técnica de la carpintería de armar solo

que a esta última se daba un dimensionamiento mayor (Berg Costa, 2015) como cita Lorenzo Berg en su tesis doctoral el caso mencionado por Candela de un tratadista francés que utilizaba frases como por ejemplo “Y le darás dos, tres o más pulgadas según la grandeza del edificio” (2015).

Este tipo de construcciones requirió de un trabajo logístico que se llevó a cabo mediante un sistema no visibilizado pero sí de gran importancia, que es el sistema de numeración de piezas. Este consiste en marcar las piezas con información sobre su ubicación exacta correspondiente a cada junta específica dentro del conjunto (D'Alençon Castrillón & Prado García, 2013).

En Alemania las uniones de elementos se armaban en los talleres de los carpinteros, se marcaban las piezas, se desmontaban y posteriormente eran enviadas al terreno para el montaje (D'Alençon Castrillón & Prado García, 2013). En Chile se dio que se montaba un taller en el lugar de la obra para protección de las inclemencias del clima y las piezas eran marcadas con cinceles según su posición dentro del conjunto (Cherubini Zanetel, 2019). Así este sistema de marcas específicas permitió dar propiedades de prefabricación a la estructura, pero también los símbolos empleados para marcar son el resultado de lo que las herramientas permitían ya que en Alemania se pasó por distintos tipos de identificación tales como símbolos sin lógica aparente, de adición de símbolos, números árabes y romanos, donde el que se estableció, con algunos cambios, fue el romano ya que por dificultad de realizar los símbolos con los cinceles en el sistema con números árabes se optó por el romano que consiste en líneas rectas (D'Alençon Castrillón & Prado García, 2013).

Este sistema de identificación de las piezas demuestra cómo la herramienta, en este caso el cincele, va a regir el sistema de marcación empleado según el sistema que entrega la menor dificultad para ejecutar los caracteres (D'Alençon Castrillón & Prado García, 2013), aspecto guiado por el grado de constructividad entregado por las limitaciones o desventajas de la herramienta, en este caso generar geometrías no ortogonales con facilidad.

El sistema constructivo basado en la técnica de uniones carpinteras fue reemplazado por el *plataform frame* debido a que ofrecían mayor rapidez y menor costo económico junto con la necesidad de carpinteros menos especializados, lo que llevó a perder la oportunidad de experimentar nuevas soluciones con esta técnica (Verdugo Bascuñán, 2021). Hoy en día al aparecer herramientas de fabricación digital que cuentan con otras propiedades permite volver a mirar hacia este antiguo conocimiento ancestral (Argüelles Alvarez, 2010) pudiendo dar la oportunidad de continuar agregando conocimiento a la técnica y aumentar su grado de constructividad para cumplir con los requisitos contemporáneos.

7) Breve contextualización sobre las herramientas digitales

La aparición de la herramienta digital como la CNC en sus primera generación no causó gran impacto dentro de la construcción debido a que sus resultados en cuanto a precisión y calidad no superaban a los de un artesano, por otra parte lo sucedido con la introducción de los brazos industriales traídos desde la industria del automovilismo a la

arquitectura en 2005 Fabio Gramazio y Matthias Kohler (González Böhme L. , Maino Ansaldo, Quitral Zapata, & Hurtado Saldías, 2017) pero no causó gran interés a los arquitectos ya que la programación era difícil de hacer y ralentizaba el proceso, pero cuando se desarrollaron softwares en 2011 que permitió controlar la herramienta de forma afable y una relación visual con el proceso es que la herramienta tomó mayor valor para insertarse en un proceso constructivo al poder ser usada por cualquier persona sin conocimiento previo sobre programación de robot industriales, sino mediante programas de diseño paramétrico (González Böhme L. , Maino Ansaldo, Quitral Zapata, & Hurtado Saldías, 2017). Esto apunta a que la inserción de una nueva herramienta no está en su tarea sino en las ventajas y posibilidades que aporta dentro de un proceso de fabricación al momento en que ayuda a mejorarlo, ya sea ofreciendo mayor rapidez, menores costos, aumento de productividad, entre otros.

Es preciso mencionar que son los brazos robóticos industriales utilizados como punto de comparación con las herramientas artesanales y la constructividad que entregan debido a que presentan mayor libertad de movimiento gracias a la cantidad de ejes que poseen frente a otros como las CNC, de este modo ofrecen mayor gama de libertad de acción.

Las ventajas entregadas por los brazos robóticos industriales en la construcción llegan con la idea de reemplazar a los trabajadores ofreciendo mayor seguridad, calidad y mejora de productividad al eliminar el factor de error humano (Valle Alonso, 2018). Estas herramientas ofrecen calidad, repetitividad, eficiencia, velocidad y

precisión que ayuda a disminuir el gasto de material y alcanzar diseños que de forma artesanal serían imposibles o demasiado costosos (Valle Alonso, 2018), estos motivos hacen que la fabricación digital ayude a mejorar los métodos de construcción (Khalifa, 2017), lo que lleva a que debemos llegar a pensar en soluciones que van más allá de las soluciones metálicas, y ofrecer uniones escondidas o de madera-madera (Blanchet, 2017).

Debido a estas propiedades es que se revisa la constructividad entregada por las herramientas de fabricación digital, ya que podrían permitir continuar agregando conocimiento mediante las posibilidades, ventajas y el aumento del grado de constructividad que estas significan frente a las deficiencias de las herramientas manuales para cumplir con los requisitos contemporáneos.

8) Breve revisión sobre la madera como material constructivo

La madera es un material ligero y con gran resistencia a la flexión, además al ser flexible le permite recibir bien los esfuerzos del viento y sismos (Mateo Carmona, 2020). Este material se puede modular, acoplar y ensamblar, además presenta baja conductividad térmica y alta capacidad de almacenamiento de calor, considerándose un buen aislante (Cortés Cely, 2015). Por otro lado, las faenas son en seco por lo que la fabricación de uniones es de forma rápida, acelerando el proceso constructivo (Mateo Carmona, 2020).

El avance en la tecnología ha permitido crear nuevos materiales de construcción

con diversas propiedades, pero dentro de los existentes la madera es el único considerado como sustentable y natural debido a la baja energía incorporada, el carbono que secuestra, su posibilidad de reutilización y porque es renovable (Tang & Chilton, 2019). Se ha redescubierto la madera como material estructural para la construcción en altura (Green, 2017) debido a que la utilización y el desarrollo de nuevas tecnologías han facultado que, a partir de la madera aserrada, se aplique en una configuración que le permita obtener mayor resistencia estructural y control en la variación de sus dimensiones debido a la humedad que la madera aserrada sin tratar (Tang & Chilton, 2019), en otras palabras, en esencia es el mismo material pero en otro formato.

Es preciso mencionar las propiedades de anisotropía y de higroscopia presentes en la madera ya que tienen un efecto directo en el formato y uso que se le da. La primera propiedad es que el material no presenta las mismas cualidades (conductividad, resistencia, etc.) según el sentido en que se estudia, y debido a la disposición de sus fibras es que no se considera un material homogéneo (Quintanilla Moreno & Goldsack Jarpa, 2018). La higroscopia es la capacidad que tiene ciertos materiales de absorber la humedad de la atmósfera y de retenerla (Quintanilla Moreno & Goldsack Jarpa, 2018), el cambio de esta en el material suele producir una variación en el volumen que puede generar contracción o el hinchamiento de esta, por ello conlleva a suscitar problemas, especialmente si es utilizado como elemento estructural (Mateo Carmona, 2020).

CUADRO COMPARATIVO RESULTANTE

En el siguiente apartado se revisa la relación de algunos de los aspectos asociados al concepto de constructividad pertinentes desde la perspectiva de las herramientas. El fin es comparar el grado de constructividad entregado por las herramientas de fabricación contemporáneas frente a las tradicionales durante el proceso de fabricación de las uniones.

En cada aspecto se establece la definición de cada ítem sobre cuál es el punto de comparación desde la perspectiva de la constructividad, luego se compara las deficiencias de las herramientas tradicionales frente a las mejoras que ofrecen las contemporáneas terminando con una conclusión sobre cada uno de los aspectos.

I. Estandarización del material

Las propiedades e imperfecciones del material suscitan problemas estructurales (Mateo Carmona, 2020), por esto se evitan maderas con imperfecciones en las uniones para establecer una seguridad estructural.

Se compara el material disponible según como se implementa y el proceso de selección de este.

El grado de constructividad aumenta cuando el material mejora sus propiedades.

Uniones fabricadas tradicionalmente

Los carpinteros mediante un conocimiento tácito y empírico sobre la madera (Heesterman & Sweet, 2018) lograron comprender cuales eran sus propiedades, por eso es que tomaron ciertos criterios en el diseño según cómo se comporta el material (Mateo Carmona, 2020) sin saber cuánta carga debían soportar las uniones (Argüelles Alvarez, 2010).

El porcentaje de humedad el cual, según como este varíe, hace que se expanda o se contraiga, así este cambio puede afectar la calidad de las uniones, contra esto los carpinteros cortaban biseladas en las superficies que se encontraban para evitar huecos antiestéticos producidos por la contracción al secarse la madera (Mateo Carmona, 2020).

Por otra parte, la selección del material era importante ya que el apeo de los árboles se realiza en época de invierno porque es el momento en el cual no circula la savia y por lo tanto no puede pudrirse (Gaztelu, 1899) es decir tiene variaciones en sus propiedades, a largo plazo, según la fecha de caída del árbol, que afecta el uso de este material (Zürcher, 2017). Esto lleva a que la madera pasara por tiempos de secado, donde la producción del material de calidad se ve disminuida al necesitar de este proceso.

En otro punto el dimensionamiento del material se daba proporcional al tamaño de la edificación sin una ley universal por ejemplo en la cita que hace Lorenzo Berg de Candelas se da el ejemplo de un tratadista francés utilizando frases como “Y le darás dos, tres o más pulgadas según la grandeza del edificio”. (2015). Dadas las dimensiones de las piezas era difícil saber si el material contenía imperfecciones.

Entre las imperfecciones se encuentran los nudos, las grietas, las fibras torcidas, vacíos, entre otras (Gaztelu, 1899) que afectan las propiedades estructurales de la madera (Argüelles Alvarez, 2010) y que solo pueden ser avistadas si se encuentran en las caras visibles del madero, si por el contrario están en el interior, estas son imperceptibles visualmente. Este punto significa un gran riesgo estructural debido a que no se contaba con la tecnología para advertir estas imperfecciones.

Uniones fabricadas digitalmente

Si bien el controlar el apeo de los arboles según la estación es descartable debido a la industrialización del proceso, si es factible controlar la cantidad de agua junto con la temperatura y, por lo tanto, la variación en sus dimensiones a largo plazo debido a las etapas por las que pasa el material, (Tang & Chilton, 2019) por lo tanto mientras menor sea la humedad en el material, menores serán las posibilidades de que se parta o se deforme (Wiegand, 2000).

Otra punto es que se produzcan materiales a partir de la madera natural mediante secciones menores conllevando a tener mayor control sobre la composición y las propiedades de esta (Mateo Carmona, 2020). Por ejemplo materiales como la MLE o CLT, que son compuestos a partir de láminas de madera aserrada, faculto que se eliminen las imperfecciones, mencionadas anteriormente, debido a que las capas que la componen se encuentra en menores dimensiones facilita el avistamiento de las falencias. Gracias a esto se obtiene un material estructural continuo con mayor seguridad al poder detectar y evitar las imperfecciones.

Actualmente la tecnología ha permitido crear nuevos materiales en base a la madera natural, obteniendo dimensionamientos de gran tamaño, hasta 16,6 m x 2,95 m (Tang & Chilton, 2019).

La estabilidad del material logra que la correlación entre lo diseñado digitalmente y lo fabricado aumente por lo que se tiene la exactitud de lo obtenido (Mozó, 2018) evitando la necesidad de estrategias para contrarrestar movimientos dimensionales continuos.

Por esto mediante las tecnologías utilizadas en el tratamiento es que la madera de ingeniería mejora las propiedades de la madera en bruto, obteniendo un material con mayor seguridad y resistencia estructural (Tang & Chilton, 2019), y que a la vez continúe manteniendo su carácter sustentable

Conclusión

El obtener madera de ingeniería a través de la reconstitución de madera natural permite tener un mayor control del material.

Dado lo anterior el grado de constructividad aumenta ya que evita problemas de seguridad estructural al eliminar imperfecciones, mejora las propiedades estructurales y la manejabilidad al asegurar el control del material.

II. Complejidad de proceso de fabricación

La cantidad de herramientas utilizadas da cuenta de las etapas que se deben integrar en el proceso de fabricación de las uniones.

Se revisa cómo se implementan las herramientas en el proceso de fabricación y las ventajas o desventajas de su uso según su lógica de trabajo.

El grado de constructividad aumenta cuando disminuye la complejidad de las faenas, lo que trae consigo disminución del tiempo del proceso de fabricación.

Uniones fabricadas tradicionalmente

Según Cherubini, para poder realizar los ensamblajes requeridos por el sistema estructural necesitaban al menos cinco tipos de herramientas:

- Serruchos y cierras para cortar
- Hachas de mano y azuelas para desbastar la madera
- Escoplos y formones para hacer las cajas y cortes donde no cabe otra herramienta de corte.
- Martillos y masas para golpear y producir precisión en los cortes con escoplos.
- Barrenos y taladros que permiten la perforación para colocar los tarugos.

(Cherubini Zanetel, 2019)

La cantidad de herramientas utilizadas da a cuenta de las múltiples tareas necesarias debido a que cada herramienta cuenta con un fin específico dentro del proceso de fabricación, de este modo las etapas se ven relentecidas por el tiempo que significa realizar cada corte, rebaje, medición, desbaste, entre otros. A esto se le agrega que son disimiles en entre sí, es decir cada unión se fabrica con una en cantidad de acciones relativas, por ejemplo, es difícil que una espiga se realice con 20 pasadas del cincel y que otra se obtenga con la misma cantidad de iteraciones.

La consecuencia es que no se tiene la certeza del resultado a obtener ya que cada acción realizada presenta un rango de error y por lo tanto pone en riesgo la integridad de la junta y, por tanto, el proceso de manufactura. En caso de darse un error significa establecer estrategias para rescatar lo trabajado reparándolo o comenzar con una nueva pieza y realizar todo el proceso desde cero.

Así el proceso disminuye su constructividad al tener un tiempo considerable de labrado debido a la cantidad de tareas necesarias para cumplir el fin, pero siempre existe el riesgo del error humano con la posibilidad de perder lo trabajado. Por lo tanto, la efectividad del tiempo y esfuerzo empleado no sopesa la cantidad de productos obtenidos.

Uniones fabricadas digitalmente

El rango de movimiento de los brazos robóticos al moverse a través de 6 ejes otorga una amplia gama de cortes, facultando realizar diversas tareas para lograr un proceso de fabricación en una sola etapa (Heesterman & Sweet, 2018) en donde se necesita, además del brazo robótico, una broca. Esto se da debido a que se pueden visualizar los movimientos que realizará la herramienta durante la trayectoria de fresado, de esta forma concede evitar imprevistos o problemas antes de la fabricación (Heesterman & Sweet, 2018) y buscar la trayectoria que presente la mayor efectividad, así disminuye la cantidad de herramientas utilizadas durante la fabricación y además los posibles errores que se pueden producir durante la fabricación.

Esta facultad disminuye la variedad de faenas y simplifica las etapas requeridas y, a su vez reduce la complejidad del proceso al solo requerir una trayectoria predefinida, así se evitan los errores de fresado, gasto de tiempo en reparar o recomenzar la fabricación de la pieza y la pérdida de material.

Además el establecer una trayectoria para el fresado permite que cada unión cuente con el mismo tiempo y esfuerzo invertido en el proceso, por lo que mantiene una cantidad de movimientos similar en cada iteración.

La consecuencia es que se establece el tiempo invertido, el gasto material con que va a contar el proceso y evitar el incremento debido a problemas asociados a la factura debido a la simplificación de la faena.

El grado de constructividad entregado respecto a la complejidad de la faena se ve aumentado ya que reduce la cantidad de tareas necesarias para labrar una unión y a su vez también el tiempo de esta. Así la relación entre el esfuerzo requerido para fresar y el tiempo invertido se condice con la cantidad de productos obtenidos.

Conclusión

La cantidad de herramientas necesarias en la carpintería tradicional junto con la serie de tareas específicas de cada una se ve disminuida por el brazo robótico al reducir el número de tareas realizadas, esto simplifica la faena y, a su vez, disminuye el tiempo de ejecución junto con el gasto de material debido a posibles errores durante el proceso, por lo tanto, el grado de constructividad se ve aumentado con la herramienta de fabricación digital.

III. Continuidad de iteraciones

Se observa la capacidad de producción relacionada con la continuidad que ofrece la herramienta al proceso de fabricación.

El grado de constructividad aumenta cuando la continuidad y seguridad del proceso de fabricación favorece e incrementan la producción.

Uniones fabricadas tradicionalmente

Detrás de las herramientas artesanales se encuentra el factor de la mano de obra la cual presenta una variación en su continuidad de productividad debido a factores de agotamiento.

La relación de cansancio varía debido a que la habilidad que se posee con la herramienta no es símil de un artesano a otro. Esto dificulta establecer un promedio de la cantidad de uniones, según el tipo, producidas en un cierto intervalo de tiempo.

El agotamiento y desgaste físico que implica el labrar las uniones manualmente como por ejemplo golpear repetidas veces el formón con el martillo, va aumentando a medida que pasa el tiempo de trabajo, provocando un descenso en la capacidad de fabricación del artesano. Se da el caso de que no hay una producción constante, sino que requiere de descansos que a la larga aumenta el tiempo de fabricación.

Además, estos factores reducen la capacidad de precisión de la fabricación, ya que cada repetición trae consigo un desgaste que afecta la habilidad y capacidad de operar la herramienta por parte del carpintero. Esto conlleva a posibles fallas en los cortes comprometiendo el esfuerzo realizado, el trabajo, el tiempo y material por lo que disminuye su constructividad al no establecer una seguridad en la productividad.

Este factor de la mano de obra hace que el grado de constructividad baje al no establecer una continuidad del tiempo empleado en labrar la unión, es decir, este permanece variante y aumenta según se incrementa el cansancio tras cada iteración. Por lo tanto, se da una relación inversamente proporcional en cuanto al esfuerzo físico requerido y la cantidad de uniones fabricadas de este modo disminuye la productividad.

Uniones fabricadas digitalmente

Si bien detrás de los brazos robóticos existe un operario, este se encarga de programar principalmente teniendo un desgaste mental por sobre lo físico, por lo que se considera que es la herramienta en sí la que se encarga de las iteraciones y establece la continuidad.

La herramienta de fabricación digital no se agota por lo que puede realizar la misma tarea hora tras hora (Sennett, 2013), de este modo da continuidad al proceso de fabricación al mantener el ritmo de labrado y acotar el tiempo a un intervalo conocido y establecido, de este modo se conoce la productividad entregada con un tiempo estandarizado en de mayor cantidad de iteraciones.

Conclusión

El factor agotamiento durante el proceso de fabricación mediante las herramientas artesanales genera una baja de la productividad según aumentan las iteraciones al comprometer el material, tiempo y trabajo realizado, por el contrario, la fabricación contemporánea mantiene el tiempo y esfuerzo invertido a lo largo de toda la etapa por lo

que aumentad la constructividad al entregar mayor productividad junto con asegurar la calidad y la fabricación de la unión en sí.

IV. Estandarización tiempo de fabricación

Se observa la capacidad para asegurar la estandarización de tiempo invertido en el fresado de cada pieza.

El grado de constructividad aumenta al estandarizar el tiempo estimado de fabricación para mejorar la planificación de las faenas.

Uniones fabricadas tradicionalmente

Relacionado con la cantidad de iteraciones necesarias que son relativas en cada unión y sumado con el factor de fatiga muscular y los problemas de errores en la fabricación, se da que el control en cuanto al tiempo de procesamiento de cada unión varía. Esto hace que proyectar el tiempo empleado sea estimado solo en base a la experiencia del carpintero ejecutor, variando de artesano en artesano. El no poder definir el tiempo invertido en la faena acarrea problemas de planificación afectando a otras faenas del proceso constructivo de una edificación.

Definir cuantas uniones, en un determinado tiempo, fabrica un carpintero facilita establecer la productividad entregada por este, pero al depender de la habilidad de cada uno, varía.

Por esto la constructividad disminuye al no tener certeza de los plazos pudiendo afectar otras faenas que sean dependientes de esta etapa de fabricación para su continuación, lo que a la larga genera incrementos de costos, mayor inversión de trabajo y tiempo.

Uniones fabricadas digitalmente

El poder definir las trayectorias en la herramienta de fabricación digital facilita saber cuál es el tiempo estimado del proceso logrando estandarizar la extensión del proceso de fabricación y así tener un control sobre cuánto del proceso constructivo general se debe invertir en la faena de fresado de las uniones en madera.

Por otra parte, el que la herramienta tenga un carácter de seguridad y productividad constante permite evitar errores asociados a la fabricación, generando un proceso con un tiempo de faena establecido y por lo tanto evita el aumento de costos, tiempo, entre otros al no afectar otras faenas dependientes.

Conclusión

El no poder establecer un promedio de cuál es el tiempo empleado en la fabricación tradicional y no poder sopesarlo con el intervalo de tiempo del brazo robótico da cuenta de la falta de estandarización del proceso artesanal para poder contar con mayor productividad. Por el contrario, en el caso contemporáneo, comparándolo con lo sucedido con la industria automotriz donde la utilización de brazos robóticos disminuye el tiempo de fabricación dentro de una secuencia de procesos continuos, permite definir tiempos específicos de fabricación y asegurar el evitar problemas por errores humanos. Ante esto aumenta la constructividad al poder estipular plazos de la faena y no afectar otras dependientes de estas.

V. Precisión en la ejecución de labrado

Errores de manufactura de aislados afectan al conjunto (González Böhme & Maino Ansaldo, 2019) esto si bien en un sistema de envergadura menor (un piso) no es relevante, si lo es para construcciones de mayor tamaño donde la sumatoria de inexactitudes puede producir la falla del sistema completo (Hurtado, 2020).

Se observa de qué forma la herramienta asegura la calidad de la junta y disminuyen los errores por fabricación.

El grado de constructividad aumenta cuando la precisión del fresado es mayor.

Uniones fabricadas tradicionalmente

La calidad de la unión depende de la habilidad y el conocimiento del carpintero (Tang & Chilton, 2019) a esto se le suman el aspecto del cansancio, provoca que la precisión entregada por las herramientas no sea estandarizada, por lo que no se asegura que cada unión contemple un alto grado de calidad, aun siendo que las fabrique el mismo carpintero.

Además, cada iteración cuenta con el factor de error durante el proceso de fabricación, suscitando problemas en el tiempo de la faena, en la cantidad de material utilizado, un aumento en los costos, y por lo tanto disminuye la constructividad de la etapa.

No es que el carpintero no presente una gran precisión sino que este debe poseer una formación extensa para asegurar la exactitud con la que es labrada cada unión y por lo tanto su calidad, pero siempre está el riesgo de un error durante la fabricación.

El grado de constructividad baja al no poder asegurar la calidad de la unión por lo que el cumplir con el estándar esperado en las terminaciones al no tener control sobre cada corte, rebaje, desbaste, etc. realizados. Lo que conlleva un problema durante el proceso al poder generar errores y tener que invertir en repararlos o rehacer el trabajo, y por otra parte una vez ya instalada la junta, dependiendo de la calidad, puede comprometer la integridad estructural del conjunto.

Uniones fabricadas digitalmente

La calidad con que se realiza los cortes depende de las revoluciones con las que gira la herramienta de fresado (brocas) y la calibración de esta, por lo que no depende de la habilidad de quien programa. Este aspecto marca una diferencia fundamental en cuanto a la condición final de precisión de la unión debido a que no responde a una capacidad que se puede ver afectada por cualidades de las herramientas manuales tales como desgaste, fatiga muscular, habilidad con la herramienta entre otros, asegurar que una vez solucionado el problema de las revoluciones o calibración se asegura de que las iteraciones van a cumplir con los estándares esperados.

Es el control numérico de la herramienta es el que otorga la certeza de la precisión y por tanto el eliminar el factor del error humano durante la fabricación, dotando de mayor constructividad al tener una faena con un control sobre la calidad del resultado esperado. De esta forma también permite que se relacione lo diseñado con lo fabricado evitando las disimilitudes entre estos.

En las siguientes imágenes se da un ejemplo sobre la calidad de una unión carpintera fabricada tradicionalmente y su reproducción con un brazo robótico de estas por Luis González y Sandro Maino para el catálogo Uniones carpinteras de Valparaíso: La geometría de ensamblajes y empalmes.



Imagen 4|

Ensamble de media cola de milano ciega

Fabricación tradicional



Imagen 5|

Ensamble de media cola de milano ciega

Fabricación contemporánea

Conclusión

La relación entre habilidad del carpintero y la precisión de este no otorgan la seguridad para establecer un estándar de producto a obtener debido a que cada unión varía. La constructividad de la unión se ve aumentada mediante la fabricación digital al asegurar la calidad de esta y que va a cumplir con un estándar al igual que las copias.

VI. Límites técnicos de la herramienta

La geometría está relacionada con el comportamiento estructural de las uniones (Erman, 2002).

Se revisa la limitación de generar formas debido a la factibilidad que entregan las herramientas

El grado de constructividad aumenta cuando se tiene mayor control sobre la geometría empleada para explorar nuevas soluciones.

Uniones fabricadas tradicionalmente

La habilidad de los artesanos se ve limitada por la geometría que presenta la mayor efectividad de la herramienta, los carpinteros con el conocimiento tácito comprendían el cómo trabajan estas y por lo tanto evitaban el uso de curvas en los diseños de las uniones ya que son un reto para fabricar manualmente (Heesterman & Sweet, 2018), por esto es que la geometría de las uniones está determinada por las facultades de las herramientas.

En el sistema de identificación de piezas es un ejemplo de lo mencionado ya que el sistema numérico árabe y otros son descartados y reemplazados por el romano (imagen 6 y 7) debido a la simplificación de sus símbolos para ser creados con el cincel (D'Alençon Castrillón & Prado García, 2013)

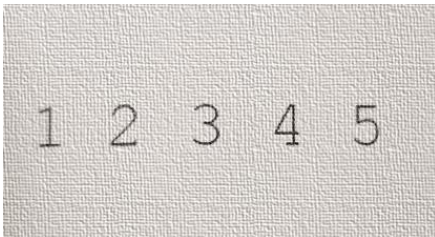


Imagen 6|

Sistema de números árabes



Imagen 7|

Sistema de números romanos

Esto establece un límite en la geometría y por lo tanto lo que es factible de labrar mediante las herramientas manuales. Ante esto se ve truncada la evolución de la técnica al no ser eficiente la exploración de variaciones en los tipos de uniones mediante el uso de geometrías no ortogonales.

Las herramientas artesanales presentan un bajo de constructividad al limitar las geometrías posibles, produciendo un estancamiento en la búsqueda de soluciones de encuentros fuera de la geometría ortogonal.

Uniones fabricadas digitalmente

Los brazos robóticos al contar con 6 ejes de movimiento y control numérico factibilizan la trayectoria de la fresa para labrar formas fuera de la ortogonalidad.

El hecho de no poder crear cantos interiores, por ejemplo, en una caja modifica la geometría de la unión debiendo generar una curvatura en las esquinas de esta para permitir que la fresa genere la unión, por lo que a la herramienta contemporánea no es una faena simple el generar encuentros ortogonales cuando se ve limitado su rango de acción.

En un estudio realizado por Heesterman y Sweet, en el que replican uniones carpinteras mediante un brazo robótico, pasan a una etapa de exploración en la cual cambian la geometría ortogonal e integran curvas al diseño (imagen 8) y posibles variaciones (imagen 9). Con el resultado obtenido demuestran que la herramienta posibilita generar curvas y por medio de esta integración podría darse la mejora del comportamiento mecánico de la unión.



Imagen 8|

Unión exploratoria con curva

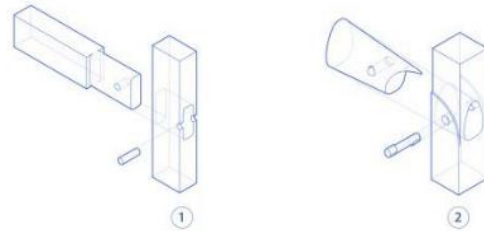


Imagen 9|

Variación de caja y espiga con bloqueo

La herramienta digital al tener el control en todo momento de la trayectoria del fresado factibilizando integrar geometrías no ortogonales (Lara Bocanegra, Roig Vena, & Domínguez Sánchez de la Blanca, 2014) pudiendo de esta forma continuar con el proceso de evolución junto con agregar conocimiento a la técnica al permitir entrar en un área que se veía imposibilitada acceder por medio de las herramientas tradicionales.

La constructividad se ve aumentada ya que permite flexibilidad para la fabricación de geometrías complejas, ofreciendo la oportunidad de nuevas soluciones

Conclusión

Las herramientas tradicionales presentan una limitación en las geometrías que se pueden trabajar debido a la factibilidad que ofrecen estas, por el contrario las propiedades de las herramientas tradicionales tiene un grado mayor de flexibilidad entorno a la producción de formas, por lo que posibilita la exploración de nuevas soluciones al poder variar la geometría ortogonal pudiendo potenciar la técnica y continuar con la evolución de esta.

CONCLUSIONES FINALES

Los parámetros establecidos en el contexto actual por el cual se descartaron las uniones carpinteras fabricadas artesanalmente se ven superados por las propiedades que poseen las herramientas de fabricación digital, gracias a estas la técnica de uniones carpinteras se ve actualizada cumpliendo con los requisitos contemporáneos.

Entre los requisitos que se ven remediados son el carácter que entrega el material al expandir las facultades de construcción en altura junto con ofrecer seguridad debido a su integridad como material y a su vez almacenar carbono. Por otra parte, la herramienta favorece la simplificación de la etapa de fabricación, permite mantener una productividad continua, evitar los errores humanos de facturación, estandarizar el tiempo de la etapa y aumentar la precisión, obteniendo un proceso de fabricación ampliamente mejorado frente a lo ofrecido por las herramientas tradicionales.

Las herramientas de fabricación digital facultan la revalidación de la técnica debido a que entregan un grado de constructividad al proceso de fabricación que le permite competir con las razones por las que el contexto implemento las uniones de acero, motivos asociados a rapidez, costos y mayor precisión. Además, favorecen la posibilidad de continuar sumando conocimiento a este saber ancestral, que vio truncada su evolución por el reemplazo por otros sistemas de uniones, dando la oportunidad de seguir en búsqueda de nuevas soluciones en este saber hacer para construir en mediana altura.

Esta investigación suma antecedentes para poder mejorar los estándares de lo que se trabaja actualmente en el desarrollo de uniones en madera en la construcción en mediana altura, las que en un largo plazo deben llegar más allá de las soluciones conocidas y pasar al siguiente nivel, en cuanto al aspecto técnico, nutriéndose del conocimiento empírico de esta técnica para dejar atrás las uniones de acero.

Ante lo revisado, surgen inquietudes para guiar posteriores líneas de investigación, las cuales nacen a raíz del planteamiento de que la arquitectura debiese encargarse desde una realidad tecnológica para la búsqueda de estándares mayores en el desarrollo uniones en madera, y el primer paso podría ser pasar a la comprobación empírica de lo estudiado para posteriormente a largo plazo lograr llegar a contar, en algún momento, con construcciones en mediana altura puramente en madera.

BIBLIOGRAFÍA IMAGENES

Imagen 1

663highland. (2017). *Pagoda Horyuji* [Fotografía]. Pagoda Horyuji. <http://cort.as/-LqRp>

Imagen 2

Woodify. (2020). *Building Back Better With Wood* [Fotografía]. Mjøstårnet, Norway.

<https://sustainablewood.com/building-back-better-with-wood>

Imagen 3

Plataforma arquitectura. (2014). *Construcción Tamedia* [Fotografía]. Construcción

Tamedia. [https://www.archdaily.mx/mx/02-341234/en-detalle-sistema-de-](https://www.archdaily.mx/mx/02-341234/en-detalle-sistema-de)

[ensambles-oficinas-tamedia-shigeru-ban-architects/53172d45c07a80f19a0000d9](https://www.archdaily.mx/mx/02-341234/en-detalle-sistema-de-ensambles-oficinas-tamedia-shigeru-ban-architects/53172d45c07a80f19a0000d9)

Imagen 4

González, L. (2019). Ensamble de media cola de milano ciega [Fotografía]. En *Uniones*

carpinteras de Valparaíso (pp. 124–127).

Imagen 5

González, L. (2019). Ensamble de media cola de milano ciega [Fotografía]. En *Uniones*

carpinteras de Valparaíso (pp. 124–127).

Imagen 6

D'Alençon Castrillón, R. (2013). Sistema de números árabes [Fotografía]. En

CONSTRUCTORES INMIGRANTES. Transferencias de Alemania a Chile 1852–

1875 (pp. 201–202).

Imagen 7

D'Alençon Castrillón, R. (2013). Sistema de números romanos [Fotografía]. En

CONSTRUCTORES INMIGRANTES. Transferencias de Alemania a Chile 1852–

1875 (pp. 201–202).

Imagen 8

Heesterman, M, M. (2018). *Diagrams and model of Curved Splice iterations*. Source: Authors [Fotografía].

Imagen 9

Heesterman, M, M. (2018). Locking-Through Mortise iterations. Source: Authors. [Fotografía].

BIBLIOGRAFÍA

- Macfarlane, B. (2003). Making ideas. En B. Kolarevic, *Architecture in the digital age: Design and manufacturing* (págs. 255-279).
- Abrahamsen, R. (2017). Mjøstårnet-Construction of an 81 m tall timber building. *Internationales Holzbau-Forum IHF*, 1-12.
- Argüelles Alvarez, R. (2010). Uniones: un reto para construir con madera. En 2. Real Academia de Ingeniería (Ed.), (pág. 93).
- Ban, S. (2017). Shigeru Ban: Explorando los límites de la creatividad. 6-21. (M. Landa, Entrevistador) Obtenido de <http://www.materiaarquitectura.com/index.php/MA/article/view/96>
- Berg Costa, L. (2015). Rastreo de las influencias y precedentes en la composición arquitectónica de las iglesias de Chile.
- Blanchet, P. (2017). Biomateriales y tecnologías para una nueva arquitectura. *Materia Arquitectura*(15), 82-93. Obtenido de <http://www.materiaarquitectura.com/index.php/MA/article/view/102>
- Cherubini Zanetel, G. P. (2019). *La escuela de carpinteros alemanes de Puerto Montt, su formación e influencia más allá de las fronteras*. Santiago de Chile: Editorial universitaria.
- Cortés Cely, O. (2015). Propiedades que definen los materiales resilientes en arquitectura. *Revista de Tecnología*, 14, 117-126.
- D'Alençon Castrillón, R., & Prado García, F. (2013). *CONSTRUCTORES INMIGRANTES. Transferencias de Alemania a Chile*. Ediciones UC.
- Erman, E. (2002). Timber joint design: the geometric breakdown method. *Building Research & Information*, 446-469. doi:<http://doi.org/10.1080/09613210210150991>
- Fleming, P., Smith, S., & Ramage, M. (2014). Measuring-up in timber: A critical perspective on mid- and high-rise timber building design. *Architectural Research Quarterly* 18(01). doi:10.1017/S1359135514000268
- Gasca Alonso, M. (2021). *Sistemas de entramado de madera: construcción con CLT*. E.T.S. Arquitectura (UPM).

- Gaztelu, L. (1899). *Pequeña Enciclopedia Práctica de Construcción publicada bajo la dirección de L.-A. Barrè. Nº4 Carpintería de Armar. Traducido y anotado por D. Luis Gaztelu. Segunda tirada.* Madrid.
- González Böhme, L., & Maino Ansaldo, S. (2019). *Uniones carpinteras de Valparaíso: La geometría de ensambles y empalmes.* RiL editores.
- González Böhme, L., Maino Ansaldo, S., Quitral Zapata, F., & Hurtado Saldías, M. (2017). Reconstrucción robotizada del patrimonio arquitectónico chileno en madera. 236-241. doi:10.5151/sigradi2017-038
- González Böhme, L., Maino, S., Quitral, F., & Hurtado, M. (2017). Reconstrucción robotizada del patrimonio arquitectónico chileno en madera. doi:10.5151/sigradi2017-038
- Green, M. (2017). Construcciones de madera en altura, estrategias sustentables para las ciudades del futuro. *Materia Arquitectura*, 94-103. Obtenido de <http://www.materiaarquitectura.com/index.php/MA/article/view/105>
- Heesterman, M., & Sweet, K. (2018). Robotic Connections: Customisable Joints for Timber Construction. *XXII CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL*. doi:10.5151/sigradi2018-1358
- Hurtado, M. (Agosto de 2020). Índice eficiencia estructural: Ética y estética en la construcción en madera. *Madera laminada: desempeño y aplicaciones*. Chile. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=VJREkYkMst0&list=PL7Vd6Qk6H8cRHUK8YsAOszYVrP3iVv6G5&index=125&t=5471s>
- Khalifa, M. (2017). Parametric Design Optimization and Robotic Fabrication of Joints for Irregular Grid-based Structure,.
- Landa, M. (2017). Madera, eterna juventud. *Materia Arquitectura*, 31. Obtenido de <http://www.materiaarquitectura.com/index.php/MA/article/view/106>
- Lara Bocanegra, A., Roig Vena, A., & Domínguez Sánchez de la Blanca, I. (2014). Timber structures. Genesis processes. Towards the Computational Design and robotic manufacturing. (In Spanish). En *Yes, We Are Open! Fabricación digital, tecnologías y cultura libres* (págs. 99-114). Sevilla.
- Loyola Vergara, M., & Goldsack Jarpa, L. (2011). La constructividad del diseño arquitectónico: cómo mejorar la eficiencia de construcción desde el diseño.
- Loyola Vergara, M., & Goldsack, L. (2010). *Constructividad y arquitectura: cómo mejorar la eficiencia de construcción desde el diseño*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. doi: <https://doi.org/10.34720/8vnx-jb58>
- Mateo Carmona, M. (2020). *La arquitectura de la madera en la cultura oriental: tradición y modernidad*. Universitat Politècnica de València.
- Montecinos Barrientos, H., Salinas Jaque, I., & Basaez Yau, P. (1981). *Arquitectura tradicional de Osorno y La Unión*.

- Mozó, A. (2018). Alberto Mozó: Un cohete a la luna (A rocket to the moon). Santiago, Chile. Obtenido de <https://vimeo.com/archcomputingutfsm>
- Natterer, J. (2000). The tasks of the structural engineer. En *Timber construction manual* (págs. 76-139). Birkhäuser Architecture.
- Pallasmaa, J. (2011). *La mano que piensa: Sabiduría existencial y corporal en la arquitectura*. Gustavo Gili.
- Quintanilla Moreno, A., & Goldsack Jarpa, L. (2018). *La situación actual de la construcción de edificaciones en altura en madera en Chile: realidad nacional v/s realidad canadiense*. Santiago.
- Sennett, R. (2013). *Artesanía Tecnología y Nuevas Formas de Trabajo*. Katz.
- Søndergaard, A., Amir, O., Eversmann, P., Piskorec, L., Stan, F., Gramazio, F., & Kohler, M. (2016). Topology Optimization and Robotic Fabrication of Advanced Timber Space-Frame Structures. En *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*. doi:10.1007/978-3-319-26378-6_14
- Tang, G., & Chilton, J. (2019). Constructing correctly in wood: new insights into timber technology approaches through purist and liberalist schools of thought.
- Tillería González, J., & Vela Cossío, F. (2017). Las viviendas de la colonización alemana en el sur de Chile : su influencia en la arquitectura tradicional de Valdivia a Puerto Montt.
- Valle Alonso, T. d. (2018). *Arquitectura y fabricación robotizada: robots de control numérico aplicados en la construcción*. E.T.S. Arquitectura (UPM).
- Verdugo Bascuñán, V. (2021). *Des-armar Rescate patrimonial a partir de un sistema de piezas y componentes*.
- Wiegand, T. (2000). Grading and improvement. En *Timber construction manual* (págs. 31-36). Birkhäuser Architecture.
- Wong, F., Lam, P., Chan, E., & Shen, L. (2007). A study of measures to improve constructability. *International Journal of Quality & Reliability Management*. doi:10.1108/02656710710757781
- Zürcher, E. (2017). El rol de lo invisible: Hacia una síntesis entre la ciencia moderna y el conocimiento tradicional en relación a los árboles y la madera. *Materia Arquitectura*, 44-52. Obtenido de <http://www.materiaarquitectura.com/index.php/MA/article/view/109>