



ESTRUCTURAS EN MADERA DE MEDIANA ALTURA COMO MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN

MID RISE WOODEN STRUCTURES AS IMPROVEMENT OF PRODUCTIVITY IN CONSTRUCTION

Ugarte, Juan José ^{(1)*}; Montaña, Jairo ⁽²⁾; Wiegand, Eduardo ⁽³⁾; Serra, Enric ⁽⁴⁾; Cárcamo, Sebastián ⁽⁵⁾; Delucchi, Christiane ⁽⁶⁾; Lagos, Jorge ⁽⁷⁾

⁽¹⁾ Arquitecto. Presidente de Corporación Chilena de la Madera. Santiago, Chile.

⁽²⁾ Ingeniero Civil Estructural. Investigador en Centro UC-Corma de Innovación en Madera. Santiago, Chile.

⁽³⁾ Arquitecto. Investigador en Centro UC-Corma de Innovación en Madera. Santiago, Chile.

⁽⁴⁾ Ingeniero Constructor Civil. Investigador en Centro UC-Corma de Innovación en Madera. Santiago, Chile.

⁽⁵⁾ Ingeniero Civil Estructural. Investigador en Centro UC-Corma de Innovación en Madera. Santiago, Chile.

⁽⁶⁾ Arquitecto. Investigador en Centro UC-Corma de Innovación en Madera. Santiago, Chile.

⁽⁷⁾ Ingeniero Constructor Civil. Investigador en Centro UC-Corma de Innovación en Madera. Santiago, Chile.

* Contacto: jugarte@corma.cl

CÓDIGO: 4619766

Resumen

La productividad en la construcción presenta importantes rezagos comparando con otras industrias. En este contexto la madera ofrece importantes ventajas comparativas, ya que, a través de la construcción industrializada (off-site) y un montaje acelerado en terreno (on-site), puede permitir una mejora significativa en la productividad.

Bajo la metodología del “diseño colaborativo”, contando con simulaciones sísmicas y ensayos de laboratorio, se pudo innovar en la tipología modular (3D) de construcción en maderas.

El sistema constructivo propuesto mejora el desempeño del sistema modular de 6 caras, el que provoca duplicaciones innecesarias de estructuras de muros y entre pisos, disminuyendo con ello la superficie habitable, elevando la altura de la edificación (por la duplicación de losas de cielos y pisos) y provocando con ello un sobrecosto. Se diseñó, fabricó y montó en terreno un edificio experimental a escala real de cinco pisos en marco-plataforma (entramado ligero) -por ser esta la tipología de mayor crecimiento en Chile- utilizando estructuras de madera en base a módulos prefabricados de sólo 4 caras.

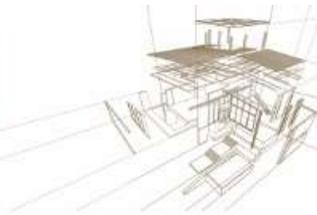
Se logró así optimizar el uso de los materiales, y aumentar la superficie libre de la planta arquitectónica sin incrementar innecesariamente la altura del edificio. Para ello se desarrollaron nuevos conectores para muros y entre pisos, se incorporó el sistema ATS para los esfuerzos sísmicos, e ideó un sistema de montaje que permitió realizar las conexiones desde el interior del edificio, sin necesidad de andamiajes exteriores. Con ello se obtuvo mejoras significativas en su desempeño de productividad, mejorando los indicadores durante el proceso de montaje en terreno.

Palabras-clave: Productividad, construcción, prefabricado, modular, edificios, madera, mediana altura.

Abstract

Unlike in other industries, productivity in construction presents an important delay. In this context, timber offers important comparative advantages, as the use of industrialized construction (off site) and accelerated assembly in field (on site) that can allow a significant improvement in productivity.

Under the methodology of "collaborative design" and the use of seismic simulations and laboratory tests, it was possible to innovate in the modular typology (3D) of timber construction.



The construction proposed system improves the performance of the modular 6-faced system unit, which causes unnecessary duplication of wall and floors structures, decreasing this way the living space, raising the height of the building (due to ceiling and floors facing duplications) and causing additional costs. A six-story wood-frame full-scale experimental building -the fastest growing typology in Chile- was designed, built and assembled using prefabricated modules with only 4-faces.

With these variations, it was possible to optimize the use of materials, and enhance the free architectural surface area without increase unnecessarily the total building height. To this end, new connectors for walls and floors facing were developed, ATS system was incorporated for seismic efforts, and an erection system was designed to allow the installation of connections from inside the building, without the need for external scaffolding. The outcome was significant improvements in productivity performance, improving the indicators during the assembly in field.

Keywords: Wood-frame prefabricated modular building, productivity performance.

1. INTRODUCCIÓN.

En los años recientes instituciones públicas como privadas en Chile están en búsqueda y desarrollo de programas estratégicos que permitan impulsar el actual desempeño de la industria de la construcción en términos de su productividad. Se tiene que al evaluar los niveles de crecimiento operacionales de la construcción habitacional de Chile en las últimas décadas, las cifras indican que hay un vasto desafío en el camino de mejorar la productividad de esta industria (F. & García T. 2014). En este contexto aparece una oportunidad para la madera como una propuesta de solución al ser un material apropiado para ser industrializado.

El presente artículo tiene por objetivo realizar una descripción técnica de los procesos asociados a la construcción de una torre experimental prototipo de cinco pisos prefabricada en madera con el sistema marco plataforma denominada Torre Peñuelas ubicada en Valparaíso Chile, en este sentido se tendrán en consideración la revisión de los procesos y las experiencias registradas en cuanto a su prefabricación en planta; así como las labores relacionadas con el montaje de la estructura en terreno, para esto se tendrán en cuenta como input los tiempos de fabricación de las diferentes actividades a lo largo del proyecto, con lo que se realizará una evaluación general de la productividad en los procesos.

2. ANTECEDENTES.

Chile con 14 millones de hectáreas en bosques nativos sumadas a 3 millones de hectáreas en plantaciones de las que proviene y se extrae madera industrial, se ha convertido en un país con una importante industria forestal que alcanza la segunda actividad económica en importancia de exportación, después de la minería. Sin embargo en comparación con otros países forestales productores, la construcción de viviendas en madera en Chile entre los 3 a 6 pisos es de tan solo un 0.3%, lo cual se debe a la existencia de varias brechas que se han ido enfrentando en los años recientes. Debido a lo anterior, no se cuenta con información sobre costos y procesos de producción asociados a estructuras en madera de mediana altura.

En este sentido el Centro de Innovación de la Madera (CIM), actual empresa conformada por la Universidad Católica de Chile (UC) y la Corporación de la Madera (CORMA) ha



integrado a diferentes profesionales, entidades públicas y privadas para en conjunto desarrollar un sistema constructivo que sea sostenible en Chile. Con este objetivo, además de la búsqueda de generar proyectos que incentiven el uso de la madera, nace el proyecto de construcción de una torre experimental prefabricada en madera de cinco pisos más una terraza habitable denominada Torre Peñuelas (TP) Figura 1, la cual fue edificada con el sistema marco plataforma al ser el método de construcción más viable para la mayor parte de la industria de construcción local.



Figura 1: Torre Peñuelas (TP).

El objetivo de este proyecto es desarrollar investigaciones en relación con cuatro áreas principales como son: i) El comportamiento físico-ambiental relacionado con la transmitancia térmica, las demandas energéticas, la permeabilidad, las propiedades acústicas, entre otras; ii) El comportamiento sísmico mediante la instrumentalización por medio de acelerómetros; iii) La percepción inmobiliaria de empresas y consumidores acerca de los atributos de esta materialidad; y iv) La evaluación económica del sistema constructivo para uso habitacional.

El componente de innovación asociado a la Torre Peñuelas radicó en la aplicación de un sistema de módulos de 4 caras distintos a la construcción modular tradicional como se explicará más adelante, de igual forma; se implementó la utilización del sistema ATS (Anchor Tiedown System) por primera vez en Latinoamérica como tecnología para satisfacer el diseño estructural dado las regulaciones sísmicas chilenas para edificios. Como otras características adicionales, se tienen que el edificio cuenta con una fachada ventilada para el regular el comportamiento térmico, y paneles solares en su cubierta como fuente de energía.

La construcción de los módulos con 4 caras de este proyecto nace a partir de la necesidad de evitar la duplicación de paredes así como de las losas de cielo y piso, que la construcción modular apilada tradicional de 6 caras tiene asociada, en este sentido se desarrollaron módulos con base a 3 paredes y 1 techo (sistema de 4 caras), es decir se eliminó la cara de losa de piso, y una de las caras laterales. Esta modulación sin duplicar losas y muros cuando se apilan los módulos vertical y horizontalmente uno tras otro,



reduce material (30% a 40%), gastos por el sobreuso de material (madera), gastos por Mano de Obra y gastos por tiempos de ejecución.

Constructivamente el proyecto consistió en si en varios desarrollos aplicables a los módulos y muros en el sistema marco-plataforma que permiten reducir costos en materiales, mano de obra y tiempos de fabricación en planta. Los fundamentos sobre los cuales se desarrolló la ingeniería del proyecto fue buscar que la torre contara con módulos de 4 paneles, que pudiera llevarse a terreno prefabricada al máximo considerando terminaciones interiores cercanas al 100% a través del desarrollo de conectores metálicos específicos y elementos anti-volcamiento, que fuera sismo-resistente y contara con conexiones que fueran capaces de tomar holguras, siendo simples y desarmables. Todo esto para permitir el montaje de módulos de la manera más rápida y eficiente posible, en este sentido el edificio fue diseñado para ser prefabricado en menos de un mes y montado en menos de una semana (Figura 2).

La Torre Peñuelas tiene dimensiones en planta de 4.96x4.96m en cada piso, sin embargo las dimensiones de los módulos quedaron restringidas a las capacidades de transporte por carretera, debido a que los módulos no podían superar el ancho de 3.60 metros máximo transportable por camiones, esto condicionó que los módulos se dividieran en dos partes como se presenta en la Figura 2.

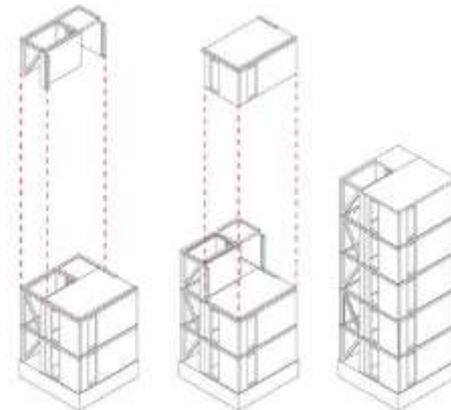


Figura 2: Proceso de ensamble de módulos en TP.

El proyecto Torre Peñuelas involucró tres etapas bien marcadas, la primera está relacionada con el diseño colaborativo y coordinado por todos los profesionales involucrados del área de arquitectura, ingeniería, especialidades, la industria y prefabricadoras, haciendo uso de la metodología BIM (Building Information Modeling), de esta forma se consigue un sistema común que conversa con todos los distintos actores.

La segunda etapa consistió en la prefabricación de los módulos en la industria, estos se construyeron en la planta de TecnoFast S.A., empresa líder en la construcción de edificios prefabricados de madera para la minería chilena. Sin embargo debido a que el proyecto tenía la innovación de las 4 caras, diferenciándose así a la construcción en línea de la compañía para el sistema de las 6 caras tradicionales con las que ellos operan, y considerando; que el volumen de la torre no era suficiente para justificar apartar una línea de producción industrial en su fabricación, ésta se realizó de forma *artesanal*.



Por último en la tercera etapa se realizó el transporte y montaje de los módulos en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, los cuales son los resultados en cuales se enfoca este documento.

3. METODOLOGÍA.

El método usado en este trabajo considera la obtención y captura de información por medio de un levantamiento de los procesos constructivos que fueron requeridos para la construcción de la Torre Experimental en Reserva Peñuelas. El desarrollo del proyecto, consto de dos etapas relevantes: Prefabricación off-site y Montaje on-site.

3.1. Prefabricación Off - site:

En la Etapa de prefabricación Off-site las mediciones se realizaron aplicando una metodología desarrollada por el Departamento de Ingeniería de Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile y la Corporación de Capacitación de la Construcción que corresponde a un sistema de control de la productividad (SCP) que consta de herramientas, entre ellas, del Muestro General de Trabajos (MGT) y de Encuestas de Detención de Capataces (EDC) (Santana, 1989).

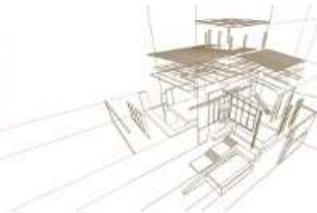
3.1.1. Muestreo General de Trabajos (MGT):

Esta metodología considera la medición del estado de obra. El nivel de actividad es determinado a partir del tiempo de la jornada que se encuentra en las siguientes tres categorías:

- I. Tiempo Productivo:** Corresponden a todas aquellas actividades que se realizan y que tienen directa relación con el objetivo o el resultado del proceso, estas se realizan en forma correcta y forman parte de una metodología de trabajo ordenada (ejemplo: todo aquel trabajo directo y medible).
- II. Tiempo Contributorio:** Corresponde a aquellas actividades que apoyan al resultado y por ende son necesarias, pero que a través de una correcta instrucción y planificación se pueden minimizar (ejemplos: consultar planos, explicar procedimientos, ayuda adicional en actividades complejas, etc.).
- III. Tiempo no Contributorio (o desperdicio):** Corresponden a todas aquellas actividades que no contribuyen al resultado, de existir una correcta planificación y generación de condiciones estas se pueden reducir para mejorar la productividad. (ejemplos: ir a buscar herramientas durante la secuencia, tiempos muertos por falta de planificación, descansos inesperados, etc.).

3.1.2. Encuesta de detención de capataces (EDC):

Corresponde a un cuestionario que se entrega a supervisores y capataces en donde deben explicar razones de las detenciones en el desarrollo de procesos constructivos.



3.2. Montaje On – Site:

La metodología aplicada durante la etapa de Montaje on-site contempló visitas a terreno, con el objetivo de obtener directamente mediciones, registros fotográficos y con ello la elaboración de controles de avances periódicos y ajustes de la programación de obra según avances reales, notas de obra y consultas al contratista de construcción.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El levantamiento de información entregó como resultado que la torre fue construida en 81 días hábiles, tiempo asociado a las obras de movimientos de tierra, construcción de fundaciones, prefabricación de la torre y la etapa final asociada al montaje.

En total se consideraron 3330 h/h para la prefabricación de la torre y 2508 h/h para su montaje y terminaciones. La superficie total construida de la torre es de 119.1m², con esto dicho se procesaron 29.77m²/mes para la ejecución del proyecto.

Como se mencionó anteriormente la prefabricación de la TP se realizó de artesanalmente, lo cual condicionó unos tardíos tiempos en la fabricación de la torre, la construcción fue artesanal estándar, sin línea de construcción ni montaje, adicionalmente fue discontinua al no contar con una buena cadena de abastecimiento de los materiales, debido a que el origen de los materiales fue por medio de donaciones, todo esto arroja unos ratio negativos de productividad a nivel de industria, lo cual evidencia que hay un frente todavía abierto para seguir mejorando.

No obstante, si se dio el supuesto de poder llevar dos trabajos o faenas ejecutándose en paralelo, específicamente; se tiene que mientras se hacía la fabricación en planta de los módulos de 4 caras, en terreno se iban haciendo las faenas de localización, trazado, replanteo, excavaciones y construcción de fundaciones. Esto es importante porque a diferencia de una construcción tradicional donde las actividades son consecutivas y esto alarga los tiempos de obra; mediante este sistema de construcción prefabricada está la ventaja de poder hacer dos tareas en paralelo.

Con respecto a la medición de productividad, se hizo un levantamiento de información de los procesos más relevantes que se describen a continuación: Prefabricación Off - site y Montaje On-site.

4.1. Registro en etapa de Prefabricación Off – site.

A continuación, se presentan como ejemplo los resultados asociados a la construcción de los módulos correspondientes al Piso 4 y Piso 5 de Torre Peñuelas.

Piso 4:

- Cantidad de Operarios: 11
- Tiempo Total Invertido: 0:37:38 minutos
- Horas/Hombre Invertidas: 6,88 horas

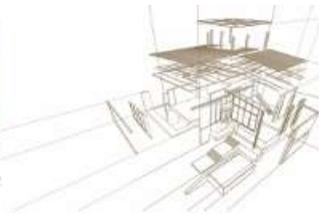
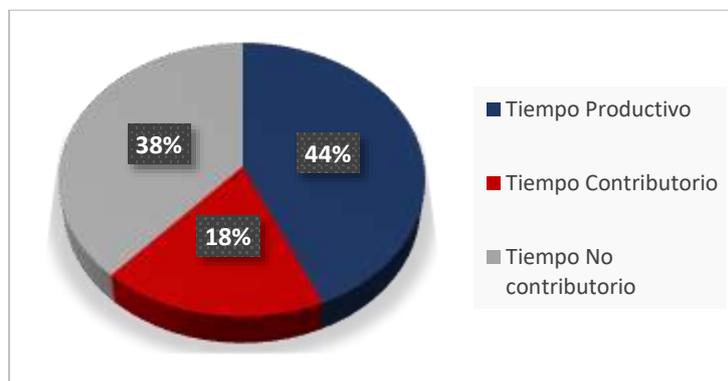


Tabla 1: Distribución de tiempos de ensamble piso 4.

| Operadores: 11 | | | |
|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| Tipo de Tiempo | Duración | Distribución (%) | H/H Invertidas |
| Tiempo productivo | 0:16:20 | 43% | 2:59:40 |
| Tiempo Contributorio | 0:06:54 | 18% | 1:15:54 |
| Tiempo no contributorio | 0:14:24 | 38% | 2:38:24 |
| Tiempo Total | 0:37:38 | 100% | 6:53:58 |

Gráfico 1: Distribución porcentual de tiempos Piso 4.



Piso 5:

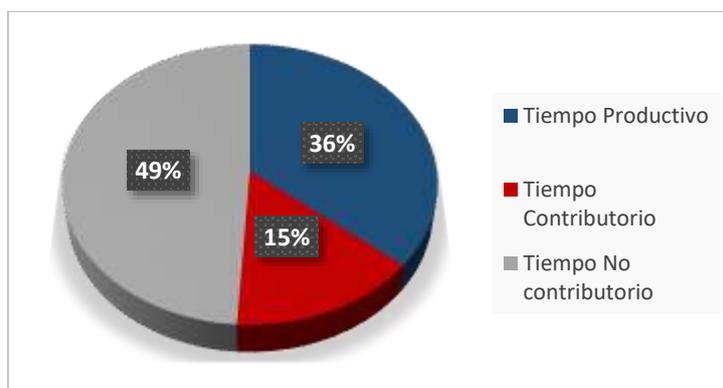
- Cantidad de Operarios: 09
- Tiempo Total Invertido: 0:37:39 minutos
- Horas/Hombre Invertidas: 5,35 horas

Tabla 2: Distribución de tiempos de ensamble piso 5.

| Operadores: 9 | | | |
|-------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| Tipo de Tiempo | Duración | Distribución % | H/H Invertidas |
| Tiempo productivo | 0:13:43 | 36% | 2:03:27 |
| Tiempo Contributorio | 0:05:32 | 15% | 0:49:48 |
| Tiempo no contributorio | 0:18:24 | 49% | 2:45:36 |
| Tiempo Total | 0:37:39 | 100% | 5:38:51 |



Gráfico 2: distribución porcentual de tiempos Piso 5



Lo anterior evidencia que si bien existió un cierto incremento en el tiempo productivo cuando se adelantó la construcción del quinto piso respecto del cuarto debido a la reducción de H/H necesarias, todavía los tiempos no contributorios siguen siendo bastantes altos.

4.2. Registro en etapa de Montaje On – site.

Según la metodología expuesta en la sección 3, se realizó la medición de los tiempos de montaje de TP, para ello se conformaron equipos que se dedicaron a medir las actividades que se desarrollaban en las plataformas o mesas de trabajo, en las actividades de izaje de módulos, y en las actividades de terminación al interior de la estructura. A partir de estas mediciones se ha desarrollado una tabla con las actividades respectivas al proceso discriminando en cada entrada el tipo de trabajo que representa (productivo, contributorio o no contributorio) la cantidad de personal participante, la duración de la actividad y la necesidad de uso de grúa.

En base a los datos obtenidos se han alcanzado los siguientes resultados:

Tabla 3: Distribución de Trabajos en Horas por cada piso de Torre Peñuelas.

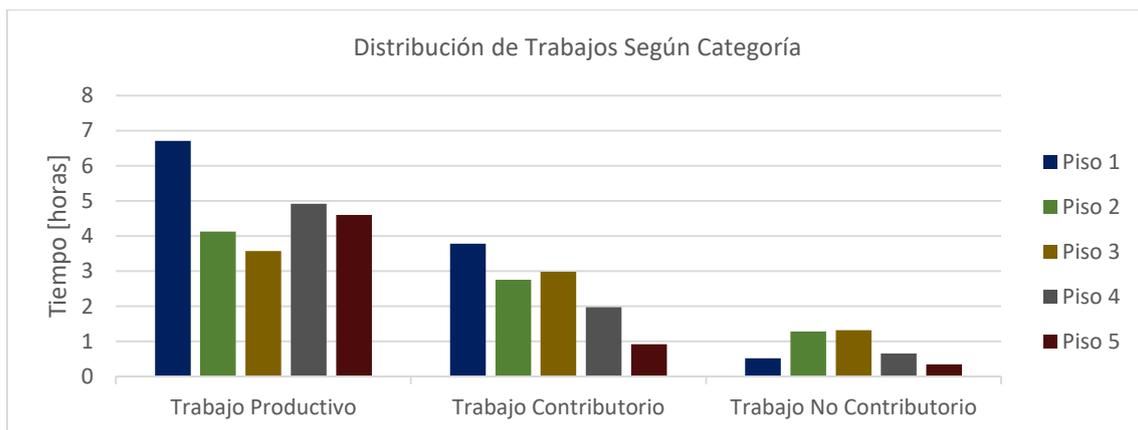
| Piso | Trabajo Productivo | Trabajo Contributorio | Trabajo no Contributorio | Total General |
|-------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|
| 1 | 6,71 | 3,78 | 0,52 | 11,01 |
| 2 | 4,13 | 2,75 | 1,28 | 8,17 |
| 3 | 3,57 | 2,98 | 1,32 | 7,87 |
| 4 | 4,92 | 1,97 | 0,65 | 7,53 |
| 5 | 4,60 | 0,92 | 0,35 | 5,87 |
| Total hrs. | 23,93 | 12,40 | 4,12 | 40,45 |



Se puede observar a través de la tabla anterior que la duración total de la actividad de montaje se vio reducida en cada piso de la torre, se tiene que para el quinto piso fueron requeridas 5.87hrs versus las 11.01hrs demandadas por el primer piso, lo cual evidencia una interesante curva de aprendizaje con un incremento en la productividad del 47% (Ver Gráfico 4). Al revisar los trabajos en cada categoría se observa que se van reduciendo en las tres categorías, pero que especialmente se reducen los trabajos contributorios. A continuación, se presenta una serie de gráficas para visualización de lo explicado anteriormente.

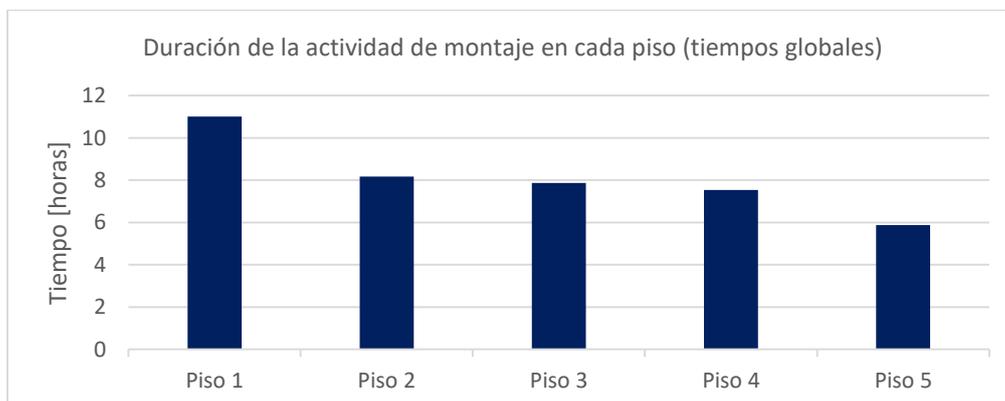
Se puede apreciar la reducción en el tiempo en las tres categorías, lo que implica un aprendizaje y optimización en los tiempos de las actividades por parte del recurso humano en la actividad. Es posible observar la reducción en los trabajos categorizados como contributorios, pues implica que en la medida que se optimizan y aprenden las actividades, es menos necesario realizar revisiones a la información de proyecto, además de contar con más precauciones previo a la actividad.

Gráfico 3: Distribución de Trabajos según categoría para montaje de 5 pisos de Torre Peñuelas.



Como resultado, la duración total de la actividad de montaje se ve reducida en cada caso, lo que se muestra en la gráfica siguiente:

Gráfico 4: Duración de la actividad de montaje en cada piso (tiempos globales).





En comparación se puede apreciar un incremento en la productividad y una reducción de los tiempos asociados al montaje de módulos al mejorar la coordinación de actividades. No obstante, es importante destacar el rol de la planificación a nivel de detalle en el resultado de actividades de este tipo, pues a lo largo del proceso de montaje se apreciaron varios frentes para seguir mejorando en reducir la incidencia de errores y descoordinaciones que resultaban en una alta tasa de tiempos no contributivos a la construcción, es decir, los tiempos de mejoras en productividad anteriores tenían todavía un alto potencial de ser mejorados, por lo tanto llevando a cabo apropiadas actividades de gestión de la construcción de este sistema puede conducir a tiempos de montaje mucho menores.

Es importante reducir los tiempos que son no son productivos para aumentar la eficiencia del proceso de construcción, es por esto que la fase de estudio de proyectos de este tipo debe realizarse en forma minuciosa y considerando la secuencia de actividades completa, poniendo como principal hito la entrega y considerar hacia atrás cada una de las etapas del proceso.

5. CONCLUSIONES.

El desarrollo de la Torre Peñuelas permitió obtener las siguientes lecciones:

1. Como punto de partida es necesario llevar a cabo el proyecto mediante la incorporación del diseño colaborativo entre arquitectura, ingeniería y especialidades con la participación de la industria, todos sobre la misma plataforma BIM, si esto se pasa por alto, las probabilidades de errores y faltas de correspondencia en las actividades futuras tienen altas probabilidades de ocurrencia. La experiencia de la construcción de esta torre sirvió como práctica y aprendizaje en el uso de la metodología y plataforma BIM relevando su importancia y necesidad de aplicación.
2. Se evidenció durante el desarrollo de este proyecto que el sistema de construcción en madera solo es eficiente de forma industrializada más no artesanalmente, al no ser posible por la envergadura del proyecto contar con una línea de construcción se tuvo una baja producción, sin embargo a pesar de que se tuvo un resultado negativo en planta, si se cumplió el supuesto de poder hacer trabajos en paralelo a diferencia del sistema secuencial en la construcción tradicional. Así se comprueba la simultaneidad, pero queda pendiente el análisis más fino en una línea de producción real.
3. Esta experiencia evidenció que la construcción industrializada en madera con este sistema de 4 caras y sus conexiones, pueden ser una buena respuesta en productividad para la industria de la construcción. Durante la etapa del montaje, se presentó una curva de aprendizaje con reducción de tiempos a la mitad entre el montaje del quinto piso respecto al primero, con potencial de inclusive mejorarse en la medida que se desarrollen más proyectos, e incidan así en adelantos de labores en la gestión de la construcción de estas estructuras.
4. Finalmente se refuerza el concepto que para una construcción industrializada es bastante importante realizar prototipos escala 1:1, esto posibilita el poder tener un mayor impacto en las curvas de aprendizaje para proyectos de envergadura.



6. AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar se agradece al Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu) por su interés y esfuerzo en apoyar estudios interesados en el desarrollo de sistemas sustentables de construcción en Chile, se agradece a Tecnofast S.A. por su donación en la construcción y montaje de la Torre Peñuelas. De igual forma se agradece a todas las demás empresas e instituciones de la industria forestal y de la construcción que hicieron donaciones a para llevar a cabo este proyecto: Arauco, Corma, CMPC, JCE, LP, Lonza-Quimetal, Pizarreño, Ignisterra, Simpson Strong-Tie, Mamut, Casas Arbolito, Centra, Quilquinta, Cutek, Dynea, Duomo, Enko, Fleischmann, Fraunhofer, Glasstech, Home Center, ICC S.A., LEAF, Longi Solar, MIL Chemical Specialties S.A., Schneider, The Woods, TKO Consultores, Topwood.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Fuentes, J., y G. García (2014), “Una mirada desagregada al deterioro de la productividad en Chile: ¿Existe un cambio estructural?”, *Economía Chilena*, vol. 17, núm. 1, pp. 4-36.

C. Álvarez, F. Rivera, H. Santa María, & M. Hube. A. Development of an exposure model of residential structures for Chile.

PrefabAUS, 2017. What is Prefab. <http://www.prefabaus.org.au/>.

Modular Building Institute. Why build modular. <http://www.modular.org>

McLening, C., Buck, L., 2012. Practice based learning approaches in collaborative design and engineering education: A case study investigating into the benefits of a crossdisciplinary practice based learning strategy. International Conference on Engineering and Product Design Education EPDE'12.

Excellence, C. (2004). Effective teamwork: A best practice guide for the construction industry. Constructing Excellence, Watford.