

2019

SISTEMA ESTRUCTURAL BASADO EN CARPINTERÍA DE ARMAR ROBOTIZADA PARA EDIFICACIÓN EN MADERA DE MEDIANA ALTURA

RAMÍREZ CERDA, MICHELLE

<https://hdl.handle.net/11673/52893>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA
VALPARAISO – CHILE



**SISTEMA ESTRUCTURAL BASADO EN CARPINTERÍA DE ARMAR
ROBOTIZADA PARA EDIFICACIÓN EN MADERA DE MEDIANA
ALTURA**

MICHELLE RAMÍREZ CERDA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA
OPTAR AL TÍTULO DE ARQUITECTO**

Profesor Guía

Dr. Francisco Valdés

Profesor Co-referente: Francisco Quitral

AGRADECIMIENTOS

En la presente investigación debo agradecer primeramente a mis profesores Dr. Francisco Valdés y Francisco Quitral, los cuáles creyeron en mí desde mucho antes de comenzar con este proceso de título y me han acompañado y ayudado incondicionalmente desde el inicio. Les agradezco por hacerme entender que soy capaz de mucho más de lo que yo creía y que la arquitectura puede verse desde diferentes puntos de vista.

Por otra parte, me gustaría agradecer a todos los profesores que participan del concurso Solar Decathlon, Pablo Sills, Dra. Nina Hormazábal, Luis Felipe González y Pablo Barros, los cuales también me acompañaron y ayudaron en todo este proceso, permitiéndome mayores posibilidades y oportunidades de crecimiento que me acompañarán por el resto de mi carrera.

También quiero agradecer a todos los integrantes del Team Chile/Metamorfosis, con los cuales he trabajado incansablemente todo este tiempo, apoyándonos y creciendo mutuamente para lograr la mejor resolución común. En especial a Andrea Arumi y Matías Correa quienes fueron un apoyo fundamental en el proceso de desarrollo de mi propuesta.

Un especial agradecimiento además a las personas que jamás me dejaron sola, que estuvieron ahí cada vez que los necesité, que me ayudaron aún más allá de los límites de la docencia, a mis amigos, Joaquín Estrada, Eleonora Sorio Noelia Bravo y Natalia Álvarez quienes jamás dejaron que cayera, y siempre esperaron lo mejor de mí.

Finalmente debo agradecer a mi novio Pablo Vargas, quien ha sido el pilar fundamental de mi vida y de todos mis años de carrera, el cual ha sido mi mente y corazón durante 9 años y mi sostén en momentos difíciles junto a nuestros perritos Espartaco y Gaudí. Y por último a mi familia, mis padres, mi hermana, mis abuelos, mis tíos y primas, que jamás me dejaron sola en ningún sentido, que de una u otra forma me ayudaron en todos los ámbitos y siempre creyeron en mí, por entregarme todos los valores necesarios para ser la mejor persona y profesional que puedo ser. Espero hacerlos sentir orgullosos, porque todo lo que soy es gracias a ustedes. ¡Gracias!



Este título de arquitecto se lo dedico a uno de los hombres más importantes de mi vida, mi tata, José Enrique Cerda Cerda, quien lamentablemente no alcanzó a acompañarme en este proceso, pero sé que siempre ha estado ahí, mirándome y brindándome toda la fuerza que necesité. Te amo tata, y sé que donde sea que estés te haré sentir tan orgulloso como pueda, porque como tú me dijiste alguna vez, tú me ayudarás a cuidar mis proyectos.

Sé que no podrás estar ahí, pero siempre estarás en mi corazón.

RESUMEN

La problemática principal que el presente proceso de título abordará, es el escaso uso de la madera como material estructural predominante en edificaciones de mediana altura en Chile. No obstante, la gran tradición de estructuras de madera en casas de Valparaíso, el bajo uso de este recurso en construcción en altura se debe principalmente al poco conocimiento de la madera ingenieril y sus potenciales técnicos, y a la falta de normativa actual en construcción con este material sobre los 2 pisos. Es así, como con esta investigación, se propone avanzar en esta materia a través del desarrollo de un nuevo sistema estructural para vivienda de mediana altura, basado en carpintería de armar en madera aserrada e ingenieril, y obtenida desde procesos de manufactura robótica. El objetivo final, donde la presente propuesta será además analizada y testeada, es la segunda participación del Departamento de Arquitectura de la USM en el concurso internacional de arquitectura sustentable Solar Decathlon 2020, a llevarse a cabo en Washington D.C. Conjuntamente, basado en requerimientos especiales desarrollados por el equipo de la USM para este evento, el presente sistema estructural deberá también permitir modificaciones en su configuración espacial, para así asegurar flexibilidad arquitectónica y la posibilidad de transformación a través del tiempo. Actualmente en países de tradición maderera como Canadá o Suiza, el desarrollo de la madera ingenieril y la creciente conciencia sobre el uso de materiales sustentables en construcciones urbanas, ha promovido una nueva corriente arquitectónica centrada en la madera como material predominante en edificaciones de altura de sistemas computacionales modernos de diseño paramétrico, análisis estructural, y desarrollos en manufactura avanzada y robótica. Todo lo anterior ha confluído en una reinención de la madera como material constructivo, y obligado el re-diseño de ensambles y modelos estructurales basados en tecnologías modernas; tópico del cual nuestro departamento de arquitectura USM no ha estado ausente. Con la correcta ejecución de las actividades del presente proyecto, se espera no solo el desarrollo de un sistema estructural moderno, eficiente y sustentable; sino que también el contribuir al posicionamiento de Chile como productor de madera y tecnologías afines, a través de la demostración de sus capacidades estructurales y arquitectónicas.

Palabras Claves: Edificaciones de mediana altura en madera, Madera Ingenieril, Carpintería de Armar Robotizada.

ABSTRACT

The main issue that the present project will address is the rare use of wood as main structural construction material in mid-height buildings in Chile. Despite the great tradition of wood structures in houses of Valparaíso, the low use of wood in mid-height construction happens mainly due to a lack of knowledge on engineering wood and its technical potential, and the lack of standards and regulations for wooden constructions over two floors in Chile. Within this research project, we propose to develop a new structural system for mid-height wooden buildings, based on carpentry and joinery on engineering wood, and manufactured by robotic processes. This present project also contributes towards the second participation of the Department of Architecture of Universidad Técnica Federico Santa María in the international contest of sustainable architecture Solar Decathlon 2020, to be held in Washington D.C. In this context, the proposed structural system also pursues to allow modifications in its spatial configuration in order to ensure architectural flexibility and the possibility of transformation over time. We call this condition as Metamorfosis. Nowadays, in timber-producing countries such as Canada or Switzerland, the development of engineering wood and the growing awareness of the use of sustainable materials in urban constructions have promoted new architectural trends centered on wood as the principal material in high-rise buildings. Thus, modern computation of parametric design, structural analysis, and development of advanced manufacturing and robotics have allowed the reinvention of wood as a constructive material for mid-height construction. With the correct execution of activities of the present project, it is expected to develop of a novel, efficient and sustainable structural system for mid-height buildings, and contributing to promote Chile as a producer of wood construction materials and related technologies.

Keywords: Medium-height buildings in wood, Engineered Wood, Robotized Carpentry.

GLOSARIO

1. **Carpintería de Armar:** Rama dentro del mundo de la construcción en madera, que se centra en el diseño y construcción de uniones, ensambles y resistencias de estructuras de madera, destacándose principalmente por no contener acero. Se desarrolla originalmente in-situ y por mano de obra especializada.
2. **Procesos de manufactura robótica:** En un contexto industrial, se puede definir como automatización, la que se define como una tecnología que está relacionada con el empleo de sistemas mecánicos-eléctricos basados en computadoras para la operación y control de la producción.
3. **Flexibilidad arquitectónica:** La flexibilidad en la arquitectura es la posibilidad que posee un ambiente, por sus características de diseño, de admitir diferentes usos o programas.
4. **Ensamblés Carpinteros:** Técnica de formar juntas, usadas especialmente en carpintería. Es la unión entre dos molduras, una de las cuales está rebajada de tal manera que se adapta al perfil de la otra.
5. **Construcción prefabricada:** Sistema de construcción cuyo diseño de producción es mecanizado, en el que todos los subsistemas y componentes se han integrado en un proceso global de montaje y ejecución para acelerar su construcción. También llamada construcción industrializada.
6. **Montaje automatizado:** En construcción el montaje automatizado consiste en un sistema donde se transfieren tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de maquinaria tecnológica. La operación es la parte que actúa directamente sobre la máquina, realizando la operación de montaje.
7. **Finger-Joint:** Es un tipo de ensamble de unión longitudinal de dos piezas de madera, reconocido como el método más estable. Se aplica para producir piezas de mayor longitud o mejorar la estabilidad.
8. **Intervalos de bahías:** Se refiere a la distancia o el espacio que existe entre un módulo de pilar-viga y otro. Palabra utilizada principalmente en el dialecto español.
9. **Postes de Arcade:** Se refiere a un término español, el que significa pilares soportantes o de pórtico, conformando un marco o pórtico en la estructura.
10. **Minga:** Es una palabra autóctona de América del Sur, la cual se refiere a una reunión solidaria de amigos y vecinos para hacer algún trabajo en común. En el caso referido especialmente a Chiloé, es el traslado de una casa de forma completa por mar de un lugar a otro.

-
- 11. Arquitectura diafragmada:** Se refiere al diseño de un sistema estructural y espacial que utiliza elementos estructurales cerrados (muros) que reparten las fuerzas en una vivienda.
- 12. Porticado de miembros:** El pórtico es un espacio arquitectónico cubierto, conformado por una galería de columnas adosadas a un edificio. En el contexto se refiere a la unión del marco de pórtico con los pies derechos de la estructura.
- 13. Mass Timber:** Es una categoría de las tipologías de estructuras de madera, que se caracteriza por el uso de grandes paneles de madera sólida para la construcción de estructuras primarias. También incluye estructuras no edificables de madera maciza de grandes dimensiones.
- 14. Chapa Laminada (LVL):** Chapas de madera delgadas y cepilladas, generalmente de 3 mm de espesor y pegadas con adhesivo estructural. Los panales de LVL se cortan en miembros estructurales, que tienen alta resistencia y rigidez.
- 15. Madera de filamento laminada (LSL):** Perfiles de madera constituidos por virutas gruesas y anchas, cuya anchura varía de 5 a 25 mm mientras que su longitud suele ser de 300 mm.
- 16. Ménsulas de madera:** En arquitectura, una ménsula es cualquier elemento estructural en voladizo que soportan algún otro elemento y funcionan a flexión. En el caso de las ménsulas japonesas, son utilizadas como puntos de carga en forma de piña para las separaciones de las vigas y pilares de los distintos niveles.
- 17. Viviendas sociales eco-sustentables:** Son viviendas de bajo costo que responden a una construcción sustentable, la que se caracteriza por mejorar el desempeño ambiental, térmico y acústico del interior y exterior.
- 18. Gentrificación:** Es el proceso mediante el cual la población original de un sector o barrio, generalmente céntrico y popular, es progresivamente desplazada por otra de un nivel adquisitivo mayor.
- 19. Transformabilidad Arquitectónica:** Se refiere principalmente a la adaptación y el cambio a las necesidades del usuario. Posición contraria a la arquitectura tradicional, que en mayor medida se encuentra fija o estática hacia las necesidades del humano.

ÍNDICE GENERAL

PRESENTACIÓN	13
+ Introducción	
+ Hipótesis	
+ Objetivos	
+ Metodología	
PRIMERA PARTE: Revisión Bibliográfica	
CAPÍTULO 1. ORÍGENES DE LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA	26
1.1 El Origen de los sistemas constructivos en madera	29
1.1.1 Estructuras Macizas (<i>Blockbau</i>)	30
1.1.2 Estructuras de Paneles o Placas	31
1.1.3 Estructuras esqueléticas o de entramado	33
CAPÍTULO 2. ENTRAMADOS EN MADERA: CLASIFICACIÓN Y DEFINICIÓN	37
2.1 Entramados Pesados (<i>Timber Frame</i>)	40
2.1.1 Entramado de Caja (<i>Box Timber Frame</i>)	43
2.1.2 Entramado Abovedado (<i>Cruck Timber Frame</i>)	43
2.1.3 Entramado de Marco (<i>Aisled Timber Frame</i>)	44
2.2 Entramados Livianos (<i>Light Frame</i>)	44
2.2.1 Sistema de Globo (<i>Ballom Frame</i>)	46
2.2.2 Sistema de Plataforma (<i>Platform Frame</i>)	50
2.3 Entramados de Marcos Rígidos	53
2.3.1 Sistema de Poste y Viga (<i>Post and Beam</i>)	53
2.3.2 Sistema de Marco (<i>Stud Frame</i>)	56
CAPÍTULO 3. CONSTRUCCIÓN EN MADERA: EDIFICACIÓN DE MEDIANA ALTURA	59
3.1 Construcción de edificación de mediana altura con madera en el mundo	62

3.2 Construcción de edificación de mediana altura con madera en Chile	72
SEGUNDA PARTE: Desarrollo del Proyecto	
CAPÍTULO 4. SOLAR DECATHLON: TEAM CHILE / CASA METAMORFOSIS	87
4.1 Team Metamorfosis: Presentación del Proyecto	92
4.2 Team Metamorfosis: Estructura y construcción del proyecto.	98
CAPÍTULO 5. SOLUCIÓN ESTRUCTURAL: SISTEMA CONSTRUCTIVO MIXTO EN MADERA	105
5.1 Metodología de diseño	107
5.2 Matriz de Requerimientos	108
CAPÍTULO 6. EDIFICIO METAMORFOSIS CHILE: DISEÑO ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO	131
6.1 Diseño Sistema Estructural	133
6.2 Diseño Detalles Técnicos	141
6.3 Diseño Proceso Constructivo/ Armado	152
CAPÍTULO 7. PROTOTIPO CASA METAMORFOSIS CHILE: CASO DE ESTUDIO Y VALIDACIÓN	157
7.1 Prototipos de ensayo y proceso de diseño	159
7.2 Prototipo Chile Final	173
CONCLUSIONES	197
BIBLIOGRAFÍA	202
ANEXOS	207

PRESENTACIÓN

+ INTRODUCCIÓN

+ HIPÓTESIS

+ OBJETIVOS

+ METODOLOGÍA



INTRODUCCIÓN

La madera como material constructivo siempre se ha asociado a viviendas de bajos recursos con pocas prestaciones estructurales, y en otro extremo a cabañas de playa, bosque con características acogedoras, que finalmente solo aprovechan la indiscutible belleza propia del material. Pero, ¿por qué no se considerada la madera como material estructural predominante en edificaciones de mediana altura en Chile? Esa es la problemática que este proyecto intenta abordar a través del desarrollo de una metodología que combina la investigación del estado actual de las nuevas maderas ingenieriles y las posibilidades de diseño estructural de dichos avances materiales y técnicos. Actualmente, la madera es reconocida en Chile como componentes aserrados o naturales, fabricados de forma industrial o a menor escala, los cuales son los más utilizados para construcciones menores o de hasta dos niveles de altura [1]. La madera como material constructivo tiene variadas características apreciables, ya que es considerado como un material duradero, ecológico y sustentable. Su composición estructural de fibras de celulosa, lignina, hemicelulosa le añade firmeza y flexibilidad, resistiendo fuerzas extremas y deformaciones no permanentes [2]. Sin embargo, la madera como material de construcción también posee varias limitaciones estructurales, de mantenimiento o de resistencia al fuego, las que cobran mayor relevancia cuando se refiere a su utilización como elemento estructural predominante en una edificación de más de un piso. Estos son los puntos críticos a evaluar al momento de comparar la construcción de madera con el acero y el hormigón; siendo éstos últimos los materiales preferidos en edificaciones de altura en Chile.

El desarrollo de madera ingenieril, que consiste principalmente en pequeños pedazos de madera orientados y unidos de tal manera, que satisfacen requerimientos específicos respecto de su función estructural [2], constituye un refuerzo positivo a los aspectos mencionados anteriormente. Por ejemplo, un mejor aislamiento térmico a través de una baja transmitancia, ayudando a reducir más fácilmente los puentes térmicos en comparación al concreto o acero. Esta madera ingenieril, además, debido a los tratamientos específicos que se han implementado, tiene un mejor desempeño contra la humedad y el fuego, lo que se vuelve vital en el desarrollo estructural de un edificio de altura.

Sin embargo, los beneficios del uso de la madera ingenieril se deben complementar con uniones que favorezcan sus características estructurales y de producción industrial. Es así, como en esta investigación, se propone estudiar y realizar un sistema constructivo basado en madera ingenieril, con un sistema de uniones manufacturados con

carpintería de armar robotizada, para así asegurar repetitividad, mantener control dimensional y finalmente reducir tolerancias de manufactura que puedan alterar el comportamiento del edificio.

En síntesis, esta investigación no solo busca estudiar los beneficios del uso de la madera como material constructivo predominante en edificaciones de mediana altura, sino que también busca promover la experimentación material con sistemas de manufactura robótica para así favorecer su masificación en el círculo productivo industrial. Estos objetivos se vuelven más significativos al trabajar sobre madera laminada o industrial, ya que estas aumentan su performance estructural para así posicionar a la madera a la par con los demás materiales constructivos predominantes como hormigón armado y acero.

La carpintería de armar robotizada, aparte de brindar características de modularidad y de ensamblaje en el proceso constructivo, será la articulación de la estructura con el diseño arquitectónico a través de un sistema transformable de uniones especiales que permitan modificaciones espaciales dentro de la edificación. El cuidado en el diseño, análisis y fabricación de dichas uniones de carpintería de armar son las que conllevan al uso de la robótica o herramientas de control numérico. De esta manera, es que se logra una correcta transmisión de cargas a través de uniones carpinteras anaeróbicas de gran superficie de contacto, que conjuntamente a su comportamiento térmico y estructural, aventajan a las edificaciones en madera con respecto a las de acero u hormigón armado [2].

Chile es uno de los países de alta notabilidad en la industria de la madera en el circuito internacional. Pero, esto principalmente se debe a los altos porcentajes de exportación de materia prima [3]. Por esta razón, es de suma importancia el avance y la reinención de los sistemas de construcción en madera ingenieril industrializada en el país; que transiten de un modelo exportador de materias primas a un modelo creador de tecnologías y nuevos materiales más eficientes y sustentables para la industria de la arquitectura nacional e internacional. ***Precisamente, este proyecto de Investigación y Desarrollo (I+D) pretende contribuir a la arquitectura no desde una instancia específica de diseño arquitectónico o proyecto de arquitectura, sino que desde el diseño y la resolución técnica de un sistema***

estructural eficiente¹, en madera ingenieril de baja huella ecológica², que además permite transformabilidad arquitectónica post-habitación. La presente propuesta es un meta-modelo arquitectónico³ ; una constitución de reglas estructurales de uniones para transformabilidad espacial, cualidad que denominamos como Metamorfosis.

¹ y ² Comparado a otros materiales preferidos en el desarrollo de estructuras habitables, como hormigón armado y acero.

³ Sistema de relaciones estructurales generativas para variadas instancias arquitectónicas

HIPÓTESIS

En esta investigación, el problema principal a abordar, a pesar de sus muchas externalidades positivas, es el *bajo desarrollo local de la edificación de mediana altura⁴ en madera, y un menor desarrollo aun de la carpintería de armar fabricada con procesos de control numérico*. Bajo esta premisa, es que se generan las preguntas principales de acuerdo a la problemática establecida en la introducción de este documento, las que posteriormente dan origen a la hipótesis:

1. ¿Es posible justificar técnicamente el desarrollo de edificaciones de mediana altura en madera usando solo carpintería de armar robotizada?
2. ¿Es posible desarrollar un sistema estructural, reconfigurable y modular, en carpintería de armar que permita transformabilidad arquitectónica post-construcción?
3. ¿Ofrecen los sistemas estructurales de carpintería de armar en madera ventajas en su huella de carbono comparados a otros materiales constructivos usados en viviendas de mediana altura?

Hipótesis: *Los sistemas estructurales en madera ingenieril (1) para edificaciones de mediana altura (2), basados en carpintería de armar robotizada (3), permiten transformabilidad arquitectónica post-construcción (4) y menor huella de carbono durante la producción de materiales y la construcción del edificio (5)*

Esta hipótesis se desglosa en términos fundamentales para la explicación posterior de los ítems a evaluar en el proceso de diseño, es por esto que se definen de manera particular como ejes de fundación de la presente investigación:

(1) Sistemas estructurales en Madera Ingenieril: Sistemas constructivos basados en madera como material estructural principal.

⁴ Se establece la edificación de mediana altura en un rango de los 3 a los 5 niveles.

-
- (2) **Edificaciones de mediana altura:** Edificaciones que superen los 3 niveles de altura, hasta los 5 niveles; Solo niveles habitables.
 - (3) **Carpintería de Armar Robotizada (CAR):** Estructuras de entramado de madera, sin fijaciones metálicas, donde todos los miembros estructurales encajan entre sí mediante cajas y espigas que son mecanizadas por un robot industrial equipado con herramientas de corte.
 - (4) **Transformabilidad arquitectónica post-construcción:** Modificación post-construcción de espacios habitables tanto vertical como horizontalmente.
 - (5) **Menor huella de carbono durante la producción de materiales y la construcción del edificio:** Baja emisión de CO2 durante estas importantes etapas del ciclo de vida del edificio.

OBJETIVOS

En base a las 3 preguntas formuladas con anterioridad, es que se establece el objetivo general y los 3 objetivos específicos fundamentales que darán origen a la solución del proyecto. A partir de esto, se desarrolla la matriz de requerimientos referidas al área ingenieril y estructural, así como también los sub-requerimientos que informan lógicamente el problema para así asegurar una verificación adecuada de la hipótesis.

Objetivo Principal:

Fomentar en el uso de la madera como material predominante y sustentable para edificaciones de mediana altura, a través del desarrollo de un sistema estructural espacialmente reconfigurable post-construcción, basado en carpintería de armar en madera aserrada e ingenieril, y obtenida desde procesos de manufactura robótica.



(Obj. específico 1) Construir un sistema estructural sustentable, de baja emisión de CO₂, desde la producción del material, manufactura de las piezas, hasta la reutilización de la estructura.



(Obj. específico 2) Construir un sistema estructural para vivienda de mediana altura que permita transformabilidad y adaptabilidad arquitectónica post-construcción, frente a cambios de estilo de vida de los usuarios en el tiempo.



(Obj. específico 3) Definir requerimientos mínimos para el cumplimiento de normas sísmicas, resistencia al fuego y prestaciones estructurales del sistema constructivo propuesto.

METODOLOGÍA

Como explicación del proceso de diseño, es que se establece una metodología de “Investigación Experimental y cuasi-experimental” [4], las cuales tienen como objetivo principal, lograr comparabilidad entre las unidades en cada grupo de tratamiento. Esto, a través de la asignación aleatoria para el caso de la investigación experimental y entorno de campos donde las personas o las variables físicas no pueden asignarse aleatoriamente por razones éticas o prácticas para el caso de la investigación cuasi-experimental. En ambos casos, la investigación busca determinar o establecer una comparabilidad efectiva a través de tantas variables como sea posible.

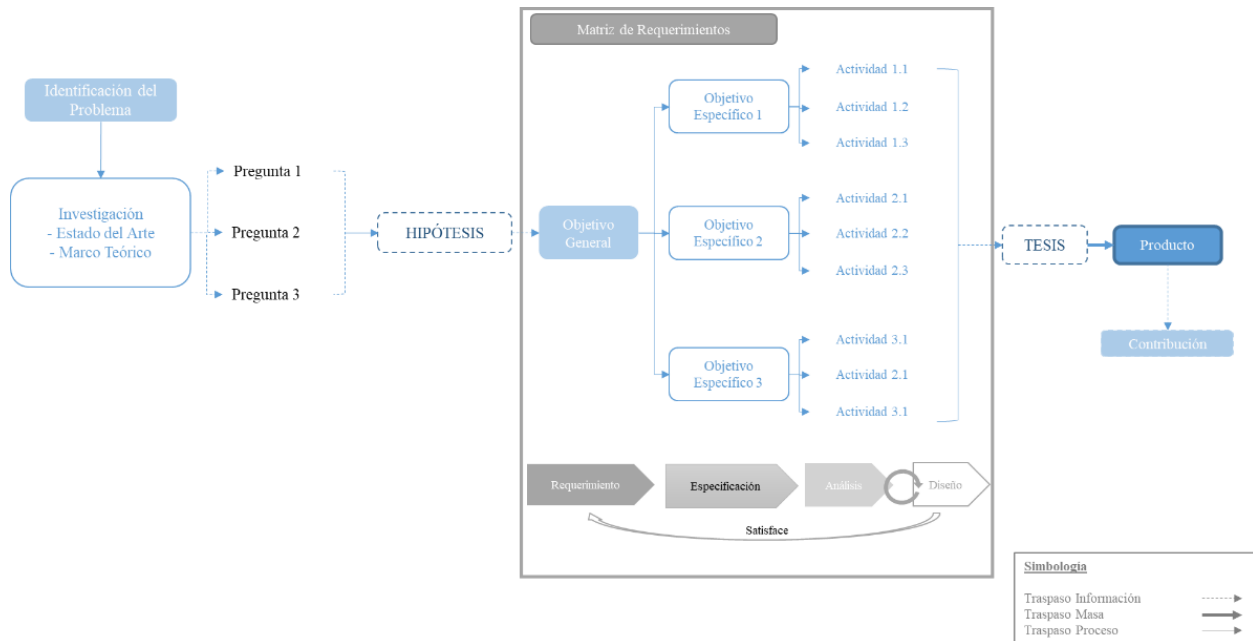


Diagrama 1. Metodología de diseño previa matriz de requerimientos. Elaboración propia.

Para la identificación del problema, es que se realiza la investigación de los capítulos anteriores (1-3), donde se determina no sólo el marco teórico actual de la construcción de edificación de mediana altura en madera, sino que también, se establece el estado actual de lo construido a través de los precedentes, identificando puntualmente la problemática del desafío propuesto. Esto a través de una investigación cualitativa y cuantitativa.

Contexto Histórico

Para comenzar, se realiza una investigación de los precedentes de origen de la construcción en madera, buscando establecer un resumen base de lo existente, para luego definir la solución final. Es de esta forma que, a través de investigaciones, papers y distintas publicaciones se realiza un cuadro resumen de las distintas tipologías de construcción en madera alrededor del mundo.

Por otra parte, para realizar el resumen anteriormente mencionado, es que se deben definir algunas áreas de selección de los distintos documentos. Realizando así, una selección de los documentos referidos a:

1. Características estructurales
2. Países del mundo donde fueron aplicados
3. Definiciones de los sistemas constructivos
4. Aplicaciones en distintos países del mundo

Es así como se utilizan investigaciones tanto del país como de otros países de las mismas características madereras que Chile. Algunas de estas investigaciones corresponden a los siguientes documentos:

- Publicaciones de internet de Revistas y/o periódicos
- Memorias de tesis y doctorados
- Libros de historia e investigación
- Documentos de investigación de construcciones históricas
- Presentaciones de investigación

De esta manera, se establece un marco teórico de información con respecto a los distintos sistemas constructivos en madera, tanto actuales como obsoletos, las distintas técnicas y desarrollos de detalles constructivos y las características estructurales que los diferencian.

Estudio de precedentes / Estado del arte

Este estudio se realiza durante todo el proceso de la presente investigación, ya que al igual que el estudio del contexto histórico, se requiere definir áreas específicas de estudio e exploración. Por otra parte, fue un proceso más complejo, ya que el área de aplicación es más acotada.

Si bien existen variados precedentes de la construcción en madera con entramado, la mayor parte son de baja altura, acotando el área de investigación de manera drástica. Además, la mayor parte de los precedentes encontrados en un comienzo corresponden a construcciones históricas y patrimoniales, considerando en menor manera las construcciones con materiales modernos, o propiamente tan con un sistema de entramado con madera laminada o sistema de placas o paneles. Es por esto, que se realiza un primer filtro de antecedentes de cada proyecto, determinando la selección de precedentes correspondientes a entramado pesados de madera (laminada o aserrada de grandes escuadrías) y/o a sistemas constructivos más modernos, como son el de paneles o placas (CLT).

Es así como se determinan dos áreas de estudio predeterminantes a escoger:

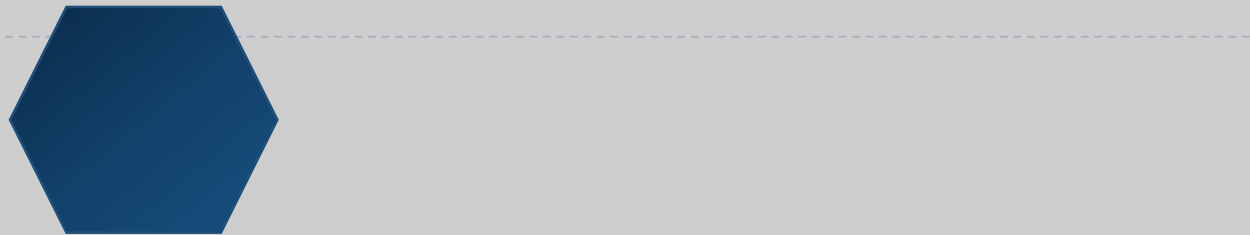
1. Precedentes de estudio a nivel mundial
2. Precedentes de estudio a nivel nacional

Posteriormente, se realiza una segunda revisión de los documentos, determinando la utilización de documentos definidos, correspondientes en su gran parte a investigaciones anteriores. De esta forma es que los documentos a utilizar en este ítem, se resumen en los siguientes:

- Publicaciones de internet de proyectos en madera de mediana altura
- Publicaciones académicas de proyectos en madera de mediana altura
- Documentos de investigación de distintos proyectos históricos de proyectos en madera de mediana altura
- Presentaciones de investigación

Finalmente, se define una cantidad determinada de precedentes seleccionados, de acuerdo a su importancia en el sistema constructivo utilizado, los detalles técnicos de uniones y la actualidad de desarrollo en algunos casos.





PRIMERA PARTE

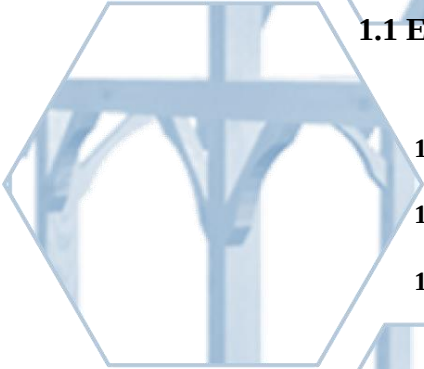


1

ORÍGENES DE LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA



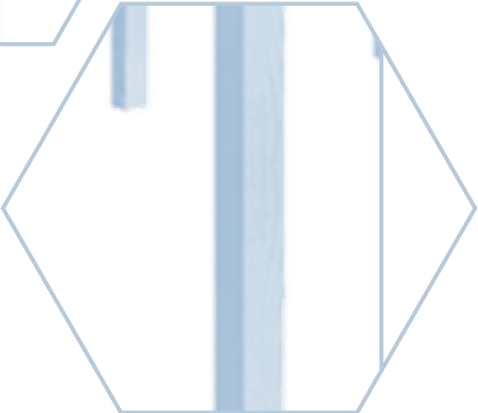
1.1 El origen de los sistemas constructivos en madera



1.1.1 Estructuras Macizas (Blockbau)

1.1.2 Estructuras de Paneles o Placas

1.1.3 Estructuras Esqueléticas o de Entramado



Capítulo 1

1. Orígenes de la construcción con madera

El uso de la madera como elemento estructural es transversal desde tiempos inmemoriales, y se ha expresado en las más diversas formas. En este apartado nos centraremos únicamente en el origen de la construcción en madera, con un énfasis técnico como precedente de aplicación en edificaciones de mediana altura.

Para la correcta comprensión de los sistemas constructivos en madera, se debe conocer el desarrollo y la historia a lo largo del tiempo, de cómo la madera desde su naturaleza, se vuelve el primer material constructivo. Desde el inicio del desarrollo humano, los hombres buscaron refugio para las distintas adversidades que debieron enfrentar, es así que, cuando ya los refugios naturales dejaron de ser suficientes (Cavernas, Montañas), comenzaron a crear sus propias chozas con las ramas secas caídas de los árboles [5]. En consecuencia, se crean así los primeros albergues adaptables a las necesidades propias de las personas. Actualmente, quedan muy pocos vestigios de lo mencionado anteriormente, sin embargo, existe un gran ejemplo que ayudará para un mayor conocimiento.

En Nueva Guinea, Indonesia, existe la última tribu aislada llamada Korowai de Papúa, los que, al ser descubiertos por misioneros holandeses, no solo mostraron su existencia y cultura, sino que también, dejaron a la vista los grandes atributos constructivos y arquitectónicos de sus viviendas [6]. Las características principales de sus construcciones, son que están construidas 100% de manera manual, con herramientas básicas de principio de los tiempos, hachas, cuchillos, creados por los propios integrantes de la tribu. Por otra parte, utilizan solo los materiales propios de su emplazamiento, ya sea madera en pequeñas dimensiones (ramas y troncos pequeños) y hojas, entre otros. Pero sin duda y su característica más importante, es la creación de viviendas sobre los árboles, incluyendo sus accesos escalonados y la ingeniería estructural que esto conlleva.



Ilustración 1. Tribu Korowai de Papúa, Indonesia. Viviendas

La Tribu Korowai se ubica en la cuenca del río Brazza, en las selvas de las estribaciones de la cordillera de Jayawijaya. Los mosquitos y la antigua rivalidad entre pueblos impusieron a esta tribu a construir sus casas en las copas de los árboles, algunas pueden ser tan altas que llegan a los 40 metros de altura sobre el suelo. Al mismo tiempo, según sus creencias religiosas, construían en altura para estar a salvo de los malos espíritus. Los Korowai aprovechan los claros que forman los grandes árboles de Bayan o Wanbom, para la construcción de sus viviendas, habitándolas junto a sus mascotas o animales domésticos. La tribu construyó así, una aldea en las alturas [6].

En la Tribu Korowai, la construcción de sus casas comienza con apuntalar postes en las esquinas, como sujeción de la estructura de losa, estos además sirven como “escaleras de acceso” que quedan para su posterior uso, realizadas con pequeños cortes de hacha directo en la pieza de madera. Primero se construye la losa, realizando un entramado de varillas que se entrecruzan para formar una grilla rígida (Ilustración 3). Posteriormente, se añaden las paredes construidas anteriormente en la superficie, y finalmente, se ensambla un techo de árbol de sagú, uniéndolos con rafia. (Ilustración 2)



Ilustración 3. Tribu Korowai de Papúa, Indonesia. Construcción de Losa.



Ilustración 2. Tribu Korowai de Papúa, Indonesia. Ensamble Estructura.

Las viviendas de entramados de madera desarrolladas por la Tribu Korowai, tienen una capacidad de acoger hasta doce personas de una misma familia en su interior, teniendo espacios separados entre hombres y mujeres, y considerando elementos fundamentales como, por ejemplo, pozos para hacer fuego (cocinas), los cuales están perfectamente diseñados, con secciones de suelo recortados para evitar futuros incendios, o propagación del fuego.

Así como esta tribu, muchos de los habitantes de lugares desiertos, tuvieron la necesidad de construir sus propias viviendas, con materiales in situ y una mano de obra artesanal, lo cual en esta investigación se pretende rescatar y reintegrar como parte fundamental de la experimentación.



Ilustración 5. Tribu Korowai de Papúa, Indonesia. Convivencia de Familias.



Ilustración 4. Tribu Korowai de Papúa, Indonesia. Distribución Interior Vivienda.

1.1 El origen de los Sistemas Constructivos en Madera

Actualmente, no se puede definir una fecha con exactitud de cuando se comenzó a utilizar la madera como material constructivo o elemento estructural para viviendas, ya que solo se ha logrado determinar a través de indicios arqueológicos, las diferentes datas de las construcciones más antiguas. Sin embargo, según la información recabada, las primeras construcciones en madera comenzaron en algunos lugares deshabitados donde solo contaban con este material para construir refugios. Algunos de éstos países son los países nórdicos y algunos lugares de Europa como Escandinavia y principalmente Inglaterra [7]. Estos países, construían viviendas con las dimensiones naturales de las piezas de madera obtenidas, sin ningún tipo de tratamiento y a través de ensambles carpinteros, desarrollados de manera artesanal con herramientas básicas y manuales.

Dentro de este marco, se comienzan a configurar tipologías constructivas en madera, que a través de la migración comienzan a diferenciarse de acuerdo a las innovaciones propias de quienes la construían, integrando cualidades autóctonas de cada país. Como se conoce, existe una gran variedad de sistemas constructivos en madera, por lo que para ésta investigación solo se desarrollará el estudio de los sistemas constructivos genéricos a mencionar con más detalle posteriormente.

Para precisar una correcta categorización de la construcción en madera, se definen de acuerdo a la forma geométrica de los elementos longitudinales, de los cerramientos o de toda la estructura de un edificio, que determinarán tres aspectos básicos de carácter específicamente estructural: Las formas en que las cargas se reparten a través de los mismos hasta los apoyos, los momentos de resistencia generados en los materiales estructurales, como reacción a las cargas, y la eficiencia de su comportamiento en cuanto a la economía de los materiales utilizados [8]. Es por esto, que se definen 3 categorías fundamentales:

1.1.1 Estructuras Macizas (*Blockbau*):

El Sistema constructivo de Estructuras Macizas es de centenaria tradición en el norte de Europa, en Rusia y en las regiones de alta montaña del centro de Europa. Este tipo de estructuras basa su estabilidad y resistencia en los muros de carga. Estos se realizan apilando rollizos de madera más o menos escuadrados, de unos 20 centímetros de diámetro. Para unirlos, se realizan encajes mecanizados, como ensambles de machihembrado y se traban en las esquinas.



Ilustración 6.
The Merikoski
Sauna, Kuopio
Finlandia /
Heikki Tegelman. 2006

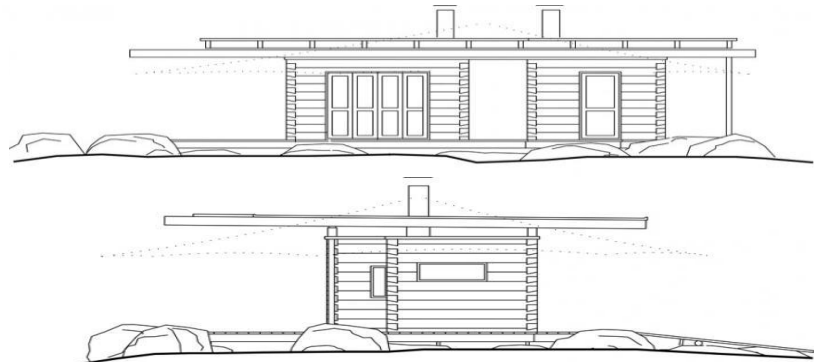


Ilustración 7. The Merikoski Sauna. Kuopio, Finlandia / Heikki Tegelman.
Elevaciones

Actualmente, se conoce como Blockbau, reinventándose gracias a la mecanización mediante maquinaria, las juntas se resuelven mediante múltiples encajes geométricos que aseguran su estanqueidad al agua y al aire. También se han añadido soluciones constructivas con presencia de acero, las cuales determinan una unión sólida, reforzándola con

pernos (para la construcción de vigas, para salvar luces y formar dinteles) y tirantes metálicos que sirven para acelerar y controlar el necesario proceso de contracción por secado.

1.1.2 Estructuras de Paneles o Placas

El sistema de estructuras de paneles o placas es un sistema constructivo que se conforma de paneles prefabricados, que permiten integrar al interior de su estructura, acabado e instalaciones, siendo paneles macizos o compuestos. Éstos paneles pueden ser fabricados en grandes formatos, simplemente limitados en sus dimensiones por las limitaciones propias del transporte en carretera, al mismo tiempo, no implica una modulación, por lo que la libertad que brinda al diseño es muy alta. La idea básica del sistema es lograr una construcción altamente prefabricada, introduciendo líneas de montaje totalmente automatizadas. Los paneles se caracterizan por ser una construcción controlada totalmente en taller, proporcionando óptimas condiciones de trabajo y de control de los componentes, facilitando la introducción de la informática para la sistematización del proceso [8]. Se diferencian en el modo de construcción del panel, es decir, en el modo de brindarle cohesión y forma. Entre ellos se clasifican en:

- Paneles de madera laminada o alistonada (HILAM): (Ilustración 8)
HILAM es madera laminada estructural, fabricada con madera seca de pino radiata seleccionada por su resistencia y apariencia, unida mediante finger-joint, formando láminas que luego se encolan por sus caras utilizando un adhesivo estructural para uso exterior. Se puede encontrar en dimensiones estándar, o bien solicitar dimensiones personalizadas, lo que brinda una mayor flexibilidad al diseño y la construcción [9].
- Paneles de madera alistonada contraplacada (CLT): (Ilustración 9)
El CLT (Cross Laminated Timber) se creó en Europa en la década de 1980, y desde entonces este sistema para construir con madera –basado en capas de madera adheridas entre sí en forma transversal y longitudinal– ha funcionado muy bien en dichos continentes, como también en países como Estados Unidos y Canadá [10]. Actualmente, se está experimentando en su creación en Chile, aunque aún no ha salido al mercado como producto se importa.

- Paneles de tablero aglomerado: (Ilustración 10)

El aglomerado de madera es un material que se vende en tableros y está compuesto por partículas de madera de diferentes tamaños, unidas entre sí por resina, cola u otro material y posteriormente prensada a temperatura y presión controlada formando el tablero. El origen de las partículas de madera y de los materiales de unión varía y de ahí que sea más o menos ecológico. Los aglomerados son las maderas más económicas, ya que están hechas con virutas de restos de maderas naturales o restos sobrantes de maderas de los aserraderos. Se llama aglomerado porque está construido con agregación o aglomeración (o unión) de varias partículas, en este caso virutas de madera [11].



Ilustración 9. Panel Madera Laminada.



Ilustración 10. Panel Madera Contraplacado (CLT).

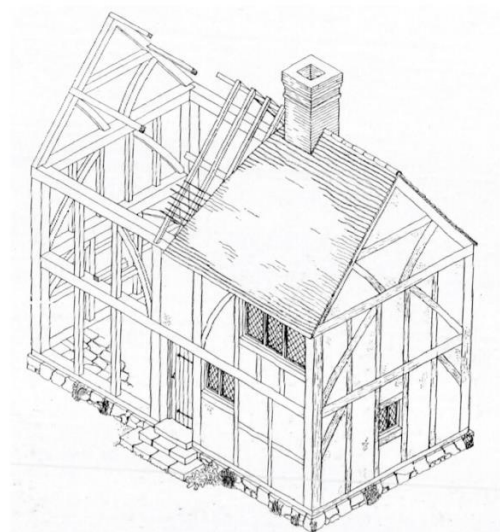


Ilustración 8. Panel Tablero Aglomerado.

Estas se explicarán con mayor profundidad en los capítulos siguientes, demostrando con proyectos de la actualidad como estos sistemas han avanzado rápidamente para edificaciones de mediana altura en países europeos y en el Norte de América, ingresando recientemente en nuestro país, pero con grandes potenciales estructurales para uso en estructuras portantes.

1.1.3 Estructuras esqueléticas o de Entramado

Según Frederick Gibberd (1947) en la segunda edición de su libro “The Architecture of England: The Architectural Press”, las primeras construcciones de entramados de madera, nacen en Inglaterra varios siglos antes de la Revolución Industrial, cuando pequeños agricultores y dueños de tierras tuvieron la necesidad de permanecer cerca de sus animales y siembras. Es así, como utilizando materiales locales comienzan a construir sus propias viviendas, siendo muchos de



ellos herreros o carpinteros que solo poseían herramientas simples y utilizaban métodos manuales. Estas casas tenían simples diseños, que podían ser de uno o dos niveles máximo, pero de espacios interiores muy determinados [12].

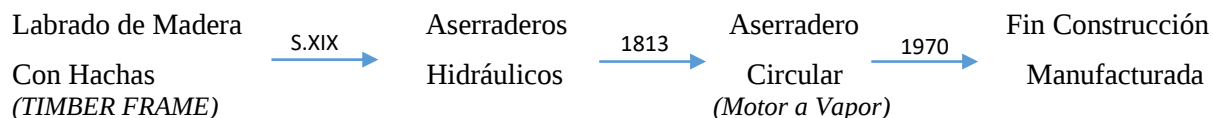
En base a esta introducción de los entramados de madera, se comienza una corriente de la arquitectura en madera para el resto del mundo con su base de diseño en Europa, de tal manera que, a través de la migración, se llevan a cabo los “Manuales de Construcción en Madera”, con prototipos constructivos y catálogos de diseño [13]. Estos catálogos fueron adoptados por los constructores encargados en cada país, los que adaptaron los estilos arquitectónicos predominantes de la época, a sus condiciones topológicas, materiales y climáticas.

Ilustración 11. Casa de Campo construida con Entramado de Madera. Gibberd, 1938 (Pág 24)

Durante este proceso de expansión, se produce un hito muy importante en la historia, y particularmente en el desarrollo de los entramados de madera; La Revolución Industrial (1760-1840). Este período no solo produce la llegada de este sistema constructivo a Estados Unidos, sino que comienza a producir cambios muy importantes en la construcción y fabricación de los elementos que lo componen. Uno de éstos cambios, es el de la mano de obra para la construcción, ya que los antiguos Carpinteros, son reemplazados por operarios de fábrica (Fabricación en masa). En segundo lugar, los materiales autóctonos y sin tratamiento, pasan a ser listones estandarizados y de menores dimensiones. Y

finalmente, y para este estudio el aspecto más importante, es el cambio de los trabajos manufacturados, particularmente los ensambles carpinteros entre piezas, son reemplazados por un proceso industrial, eliminando radicalmente los ensambles a conexiones con clavos [12].

Estos cambios, comenzaron a crear nuevos sistemas constructivos, subcategorías del sistema constructivo de entramado en madera, incorporando la industrialización y la producción en masa, los que se llevaron a cabo principalmente en EEUU como eje fundamental en el proceso de Revolución. Los nuevos sistemas estructurales comenzaron a expandirse rápidamente, debido a ser sistemas en ese momento mucho más económicos, de rápida y más fácil construcción, ya que no requerían de constructores calificados, y de mayor velocidad de producción por las nuevas tecnologías implementadas. Esto produjo también, un cambio muy importante en los aserraderos, ya que comenzaron a mutar las herramientas, para que fuesen más veloces y produjeran mayor cantidad de elementos por hora.



Los sistemas constructivos de entramado se definen como las construcciones hechas con postes y vigas, cerchas de cubierta, porticados, etc [8]. Tiene como característica principal, el que permiten alternar la madera con otros materiales, por lo que las posibilidades de diseño arquitectónico son más variadas. Por otra parte, al utilizar productos industrializados y estandarizados, permite que sea mucho rápido de construir y con mayor facilidad de disponibilidad en el mercado, lo que lo deja como el sistema constructivo más demandado, incluso en la actualidad, debido a que también resulta más económico.

Este sistema Constructivo, consta de una sub-división de otros sistemas constructivos en base a entramados, los cuales serán explicados con mayor profundidad en el próximo capítulo, y son:

A. Entramados Pesados (Timber Frame), que su vez se divide aún más en 3 sub categorías;

A.1 Box Timber Frame

A.2 Cruck Timber Frame

A.3 Aisled Timber Frame



Ilustración 12. Estructura de entramado pesado. Timber Frame.

B. Entramados Ligeros, que cuenta con dos tipologías;

B.1 Sistema de Globo (Balloon Frame)

B.2 Sistema de Plataforma (Platform Frame)



Ilustración 13. Entramado Ligero. Balloon Frame.

C. Poste y Viga

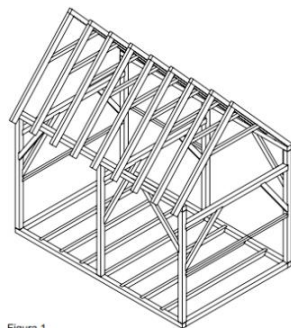
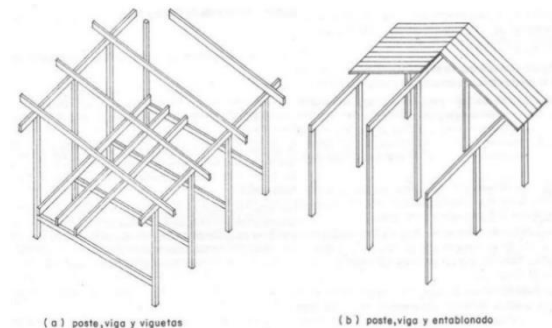


Ilustración 14. Sistema Estructura Poste y Viga. Desarrollo Constructivo.

A continuación, se realiza un resumen explicativo de los tres sistemas constructivos en madera investigados anteriormente, con el énfasis en su funcionamiento estructural, y como de acuerdo al tipo de madera utilizado, funciona de manera diferente, y se une con ensambles o estrategias determinadas, para que no pierda su resistencia y capacidad estructural.

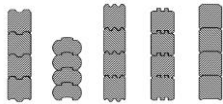
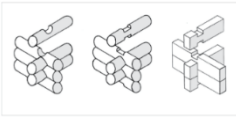
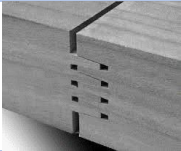
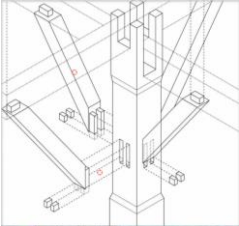
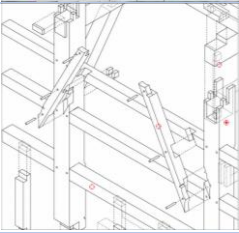
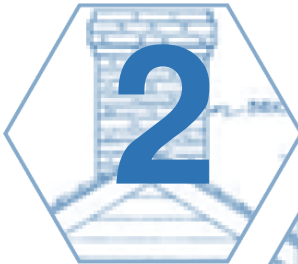
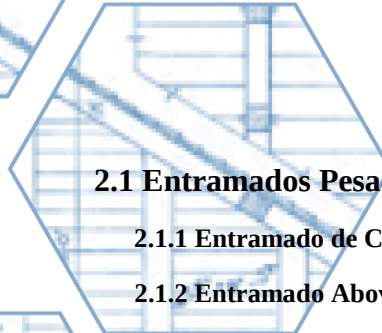
Sistema Constructivo	Tipo de madera	Funcionamiento Estructural	Unión
ESTRUCTURAS MACIZAS	Rollizos de Madera	Estabilidad y resistencia en los muros de carga	
	Maderas Coníferas: Pino Silvestre, Pino Oregón y el Abeto		
ESTRUCTURAS DE PANELES	Paneles Madera Laminada	Resistencia a Esfuerzos en una sola dirección	
	Paneles Madera Contraplacada		
	Paneles Tablero Aglomerado		
ESTRUCTURAS DE ENTRAMADOS	Madera Laminada	Las cargas son transmitidas longitudinalmente a lo largo de los elementos o cerramientos estructurales.	
	Madera Aserrada		

Tabla 1. Tabla Resumen Sistemas Constructivos en Madera. Elaboración Propia.



ENTRAMADOS EN MADERA: CLASIFICACIÓN Y DEFINICIÓN

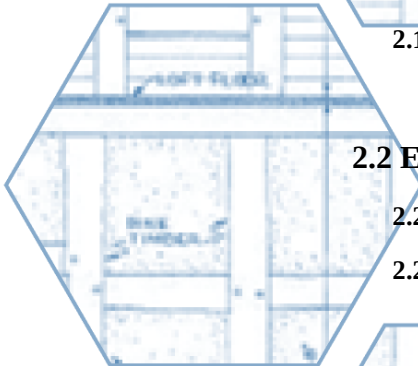


2.1 Entramados Pesados (Timber Frame)

2.1.1 Entramado de Caja (Box Timber Frame)

2.1.2 Entramado Abovedado (Cruck Timber Frame)

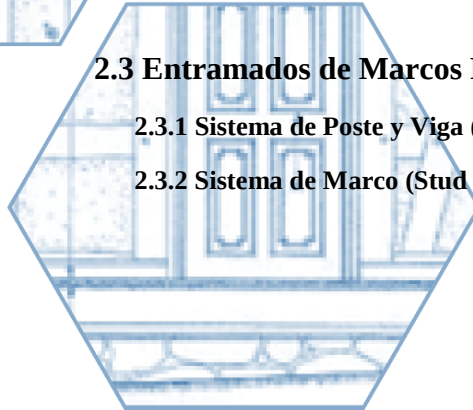
2.1.3 Entramado de Marco (Aisled Timber Frame)



2.2 Entramados Livianos (Light Frame)

2.2.1 Sistema de Globo (Ballom Frame)

2.2.2 Sistema de Plataforma (Platform Frame)



2.3 Entramados de Marcos Rígidos

2.3.1 Sistema de Poste y Viga (Post and Beam)

2.3.2 Sistema de Marco (Stud Frame)

Capítulo 2

2. Entramados en Madera: Clasificación y Definición.

Como se explica en el capítulo anterior, los entramados de madera son la tipología de sistema constructivo más comunes y utilizados, es por esto que, en esta investigación, se brindará un mayor énfasis en su definición, evolución en la historia, y principalmente en su clasificación y características de cada uno de los sub-sistemas.

La madera ofrece considerables ventajas a la hora de construir, sin embargo, hoy existe una amplia variedad de alternativas estructurales que se desempeñan de diversas formas. Por consiguiente, se deben conocer las características principales de los distintos desempeños estructurales, para una correcta proyección de obra [14].

Para comenzar con la clasificación, se debe destacar que los entramados como tipología constructiva no tienen una data exacta de su origen, por lo que su clasificación, corresponde a los estudios y precedentes recopilados desde diferentes bases de investigación, confluyendo en el diagrama anterior. (diagrama 1)

Para esto, se realiza un diagrama resumen y explicativo de todos los sistemas constructivos anteriormente nombrados y los que se explicarán a continuación:

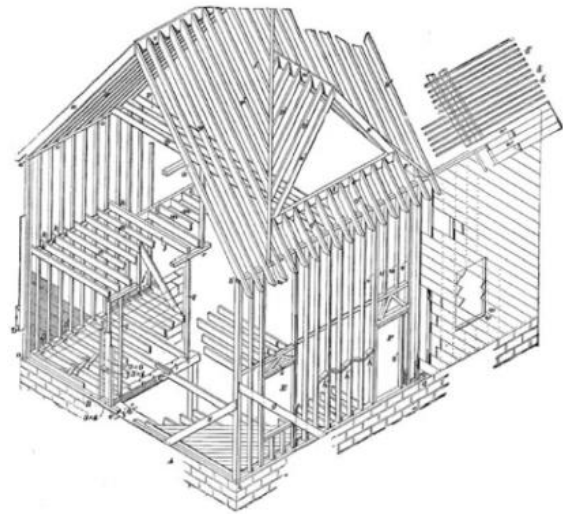


Ilustración 15. Balloon Frame Americano. Carpentry Joinery Stair Building & C (Scranton, Pennsylvania, 1904).

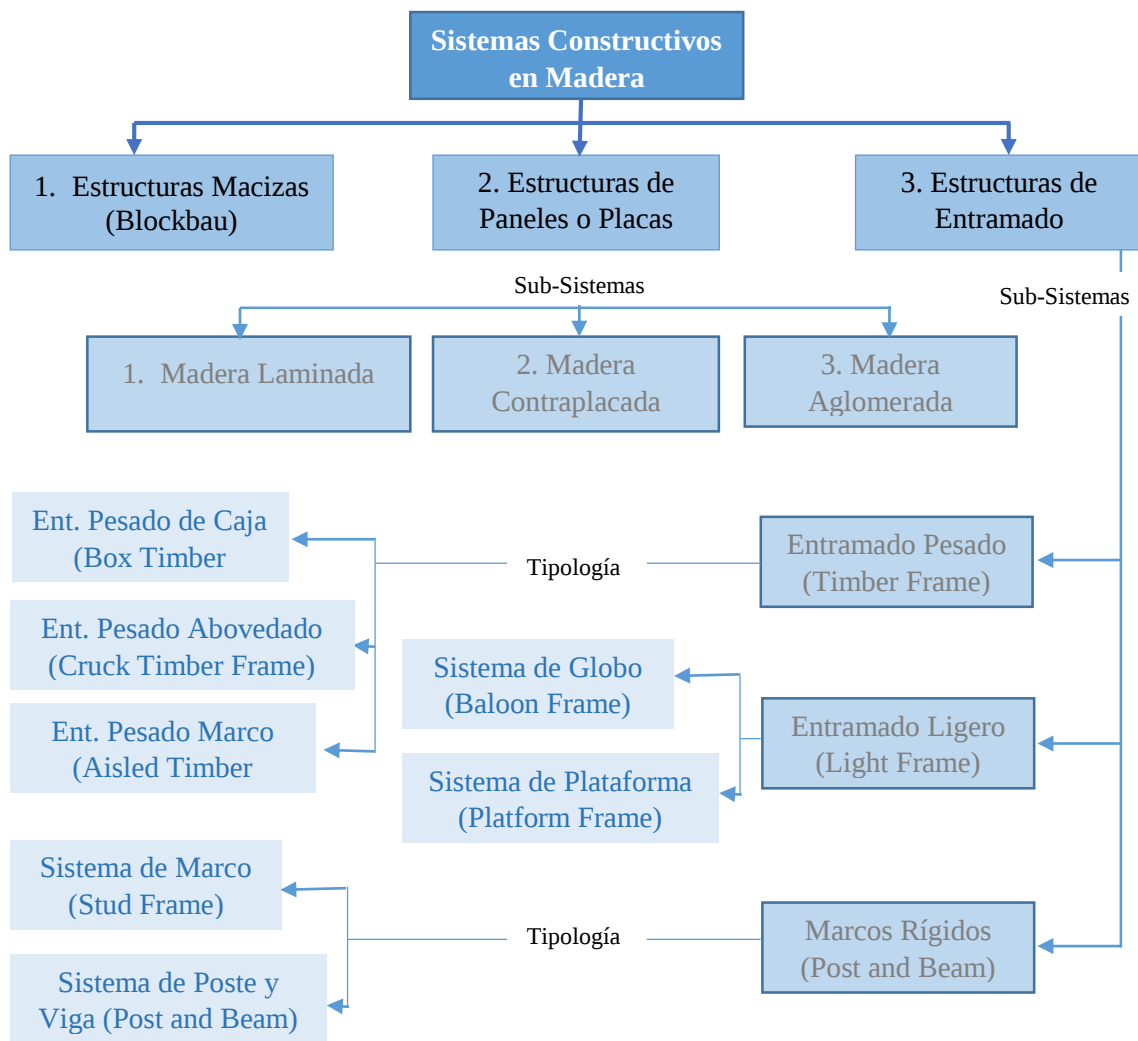


Diagrama 2. Clasificación Sistemas Constructivos en Madera. Elaboración Propia.

2.1 Entramados Pesados (*Timber Frame*)

Según estudios históricos de inmuebles restaurados [12], este tipo de construcciones constituyen una de las primeras tipologías constructivas en madera, donde se estima que su origen y apogeo se basa en la época medieval, originarios de Europa Central y Gran Bretaña. Si bien, se determina a través de edificaciones construidas en determinados años, aún se sigue estudiando, ya que, según la revista “The Old House Journal” (1980), a través del tiempo, se ha demostrado con este sistema constructivo, que fue el inicio de la metodología del entramado, principalmente en Inglaterra.

El entramado pesado o *Timber Frame*, consiste en una estructura de elementos lineales; pies derechos, vigas maestras y riostras (elementos diagonales), de secciones cuadradas de gran escuadría y con separaciones de reducida dimensión, que en determinados casos requiere de paredes rígidas para su estabilización. El entramado constituye un muro de carga, que, de manera tradicional, alrededor de los vanos entre elementos de madera, se rellenaban de mampostería de piedra, material cerámico, tapial o trenzados de madera o vegetales revocados con adobe, barro o ladrillo [8].



Ilustración 16. The Rusch Cottage, Krueger 1845. Historic American Building Survey.

Las principales características constructivas del entramado pesado, consisten en configurarse a través de piezas o elementos de mayor peso y grandes escuadrías madereras que van desde los 6 x 6”, y se unen a través de uniones carpinteras o carpintería de armar manufacturas y muy elaboradas. Por otra parte, tiene como características de construcción, sus basamentos de piedra como fundación y la configuración de su entramado relleno en cada espacio entre sus piezas.

de la unión. Es así, como desarrollando este sistema con distintas dimensiones de las piezas, es que descubrieron que el debilitamiento por pérdida de sección de los puntos de ensamble, produjeron que las secciones de los elementos fuesen más grandes. Uno de los ejemplos más comunes, es el ensamble de caja y espiga, que se explicará con más detalle a continuación, pero que data de hace más de 3000 años, donde lo atestiguan antiguas construcciones egipcias, como es el mobiliario de la tumba de Tutankamon [12].



Actualmente se utilizan aislamientos para reforzar las condiciones térmicas de los vanos, no desarrollando, por tanto, ningún papel estructural. También existen otras soluciones menos tradicionales como se observa en la ilustración 19, en la que la estructura portante se desarrolla por fuera del edificio envolviéndolo. Este precedente se explicará con mayor detalle en los siguientes capítulos.

Ilustración 18. Unión Caja y Espiga con clavijas, en una caja egipcia. Miles Lewis. Bulding as.



Ilustración 19. Edificio BIP Computers, Alberto Mozó. Santiago, Chile.

2.1.1 Entramado de Caja (*Box Timber Frame*)

Este sub-sistema constructivo consiste en marcos de pared conectados a intervalos de bahías por medio de vigas cruzadas. El techo es un elemento estructural separado que se apoya en las paredes externas, y actúa como una tapa en una caja. Los marcos de las cajas tienen vigas maestras sin correas que soportan la viga de muro en la mitad del tramo. Aunque las vigas de unión ayudaron a evitar que el peso del techo extendiera las paredes hacia afuera, se agregaron collares a los pares de vigas para disminuir la acción de expansión del techo.

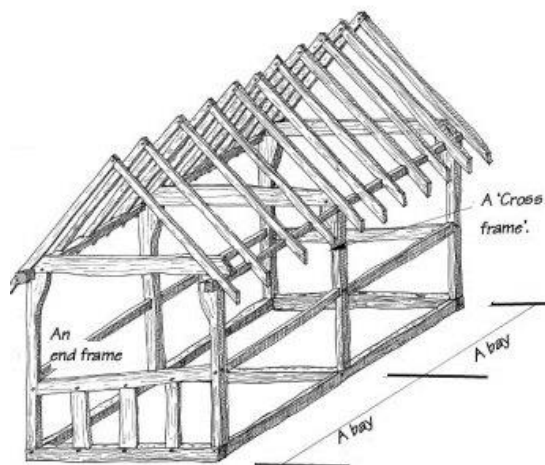


Ilustración 20. Sistema Box Timber Frame, University of the West of England.

2.1.2 Entramado Abovedado (*Cruck Timber Frame*)

La Tipología de Cruck es un sub-sistema constructivo de marcos cruzados formados por pares de maderas inclinadas, la mayoría de las veces coinciden con las mitades del mismo árbol, que se encuentran en el vértice y están atadas entre sí por algún tipo de cuerda. Por lo general, este marco 'A' soporta las soleras y las placas de pared. Así, las crucetas traspasan la carga del techo al suelo. Esto significa que las paredes externas no son necesariamente significativas desde el punto de vista estructural y, con frecuencia, actúan simplemente como un recinto.

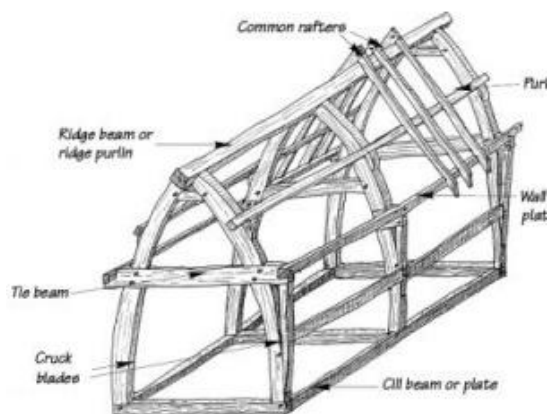
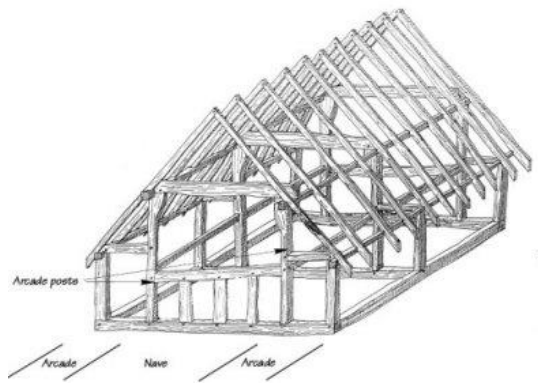


Ilustración 21. Sistema Constructivo Cruck Timber Frame, University of the West of England.



2.1.3 Entramado de Marco (*Aisled Timber Frame*)

Este sub-sistema constructivo proporciona espacios internos adicionales al dividir la estructura en una nave central y dos pasillos laterales. Los postes de pared se vuelven internos, los postes de arcade, y los pasillos están cubiertos con techos inclinados en un ángulo que coincide con el techo principal [15].

Ilustración 22. Sistema Constructivo Aisled Timber Frame, University of the West of England.

2.2 Entramados Livianos (*Light Frame*)

Actualmente es el sistema más difundido, ya que es sencillo de construir debido a que permite altos grados de prefabricación y rapidez de montaje. El 70% - 80% de los edificios construidos en Canadá, Estados Unidos, Finlandia, Suecia y Noruega son de entramados de madera, mientras que, en países como Rusia, Chile, Corea del Sur, China y Taiwán, se está introduciendo de manera expedita, considerándonos como países emergentes.

Este sistema constructivo, cobró su mayor relevancia con el periodo de la Revolución Industrial, donde los aserraderos especializados que podían elaborar piezas de pequeña escuadría, así como las fijaciones y herrajes fabricados industrialmente, comenzaron a cubrir las necesidades de disponer de construcciones sencillas y fiables, para la realización rápida y eficaz de producción de viviendas para colonizar las costas oestes americanas.

Aunque el sistema primitivo permitía entramados de dos plantas, no ha tardado en evolucionar, para ahora desarrollarse como un sistema apto para la construcción de mediana altura, lo cual será la problemática principal a investigar y desarrollar en esta investigación, para la implementación en Chile. Por otro lado, también se han ido

añadiendo nuevos materiales complementarios como son los impermeabilizantes, aislantes de vapor y de agua y protecciones de yeso como terminación de muro.

Las estructuras de entramado ligero, se basan en una serie de elementos portantes a modo de muros, formados por montantes de madera de secciones reducidas, los cuales se ubican separados a poca distancia (30-60 cm) y atados arriba y abajo por listones o soleras. Por tanto, se trata principalmente de muros de carga ligeros. Por otro lado, por encima o empotrados a éstos muros, se colocan viguetas de madera poco espaciadas, para conformar las losas de piso y/o techo, de tal manera, que la cubierta pueda ser plana o inclinada con previsión de aprovechar el cielo raso.

Las piezas de madera y metálicas de fijación están estandarizadas, por lo que, se manejan pocos tipos de dimensiones, aspecto que hace que el sistema se simplifique tanto en proceso de diseño, como durante la obra [8].

Los sistemas de entramados de madera se diferencian por la secuencia en el armado de los pisos, y la forma de apoyo de los tabiques en ellos o viceversa. Para esto se realiza la definición de los dos sub-sistemas constructivos de los entramados ligeros.

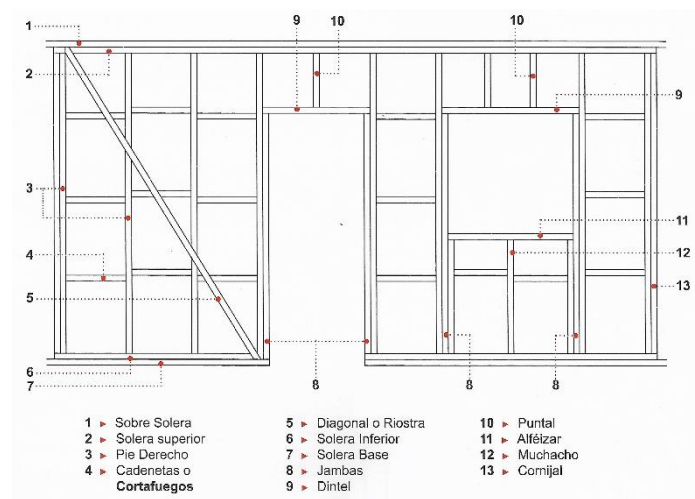


Ilustración 24. Estructuración Tabique de Entramado Ligero. Universidad del Bio Bio, Chile.

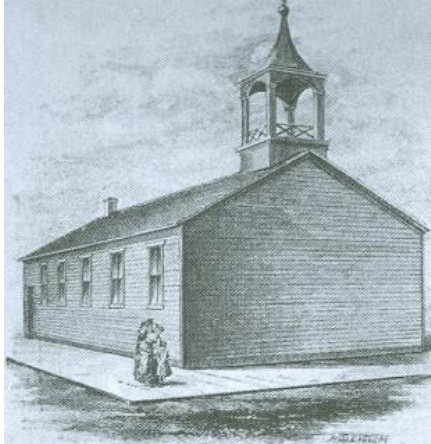


Ilustración 23. Axonométrica Entramado Ligero. Entramados de Madera, Universidad del Bio Bio, Chile.

2.2.1 Sistema de Globo (*Balloon Frame*)

Según Sigfried Giedion (1941) [12], en la 1ª Edición *Histografía de la Arquitectura Moderna*, artículo; “Espacio, Tiempo y Arquitectura”, en el capítulo “La Evolución de América” se recaba como el primer antecedente crítico del inicio del Balloon Frame, donde se destaca su creación debido a la industrialización de la época. Donde se determina su origen, debido al desarrollo de la estandarización e industrialización del clavo, brindando un crecimiento exponencial en el desarrollo y evolución de los entramados ligeros.

Por otra parte, Giedion en 1968, determina según antecedentes, que el creador de este sistema constructivo fue George Washington Snow, en Washington DC, determinando que cambió la manera de construir anterior, fijando piezas o elementos constructivos estándar y definidos, como lo son los pies derechos, vigas, y riostras. Éste, tenía una formación anterior de Ingeniería Civil, lo que se presume fue el propulsor de los detalles técnicos del sistema constructivo. El Primer edificio bajo este concepto es el de St. Mary Church en Chicago, la primera iglesia católica de la ciudad, donde se implementan todas las características mencionadas anteriormente [12].



El edificio, con su esqueleto de delgados maderos cortados a máquina y su recubrimiento de tablas, se desarrolló a partir de las casas de labranza del siglo XVII levantadas por los primeros colonos. Snow comenzó con esos métodos tradicionales, y los fue modificando y adaptando para aprovechar las nuevas posibilidades de la producción, de un modo que era tan sencillo como ingenioso [16].

Hasta los años 1870, el sistema constructivo de Balloon Frame, se llamó simplemente la Chicago Construcción, como se sabe por un informe del comisario federal H. Bowen, publicado en Washington en 1869.

Ilustración 25. St. Mary Church, Chicago. Sigfried Giedion. *Espacio, tiempo y arquitectura: origen y desarrollo de una nueva tradición*. Edición definitiva. Barcelona: Reverté, 2009

En 1887 el arquitecto Frank Lloyd Wright, tras trabajar desde los inicios de su carrera en la empresa de Adler y Sullivan, conocidos por dedicarse en edificación con el sistema de Balloon Frame en Chicago, decide emprender un camino de manera independiente en la construcción de viviendas sociales pre-fabricadas, iniciando el estilo de construcción in-situ. Esta, es una de las características principales por la que este sistema aumento su relevancia en la construcción, ya que esta peculiaridad de ensamblado in-situ y su bajo peso estructural, permitió que las edificaciones o viviendas, pudiesen trasladarse de un lugar a otro de manera íntegra para colonizar, lo que se llama en Chile como “la Minga”. Este movimiento, comienza específicamente en San Francisco, Chicago, como se puede mostrar en las ilustraciones 26 y 27.



Ilustración 26. House Movers of San Francisco, by Dave Glass.

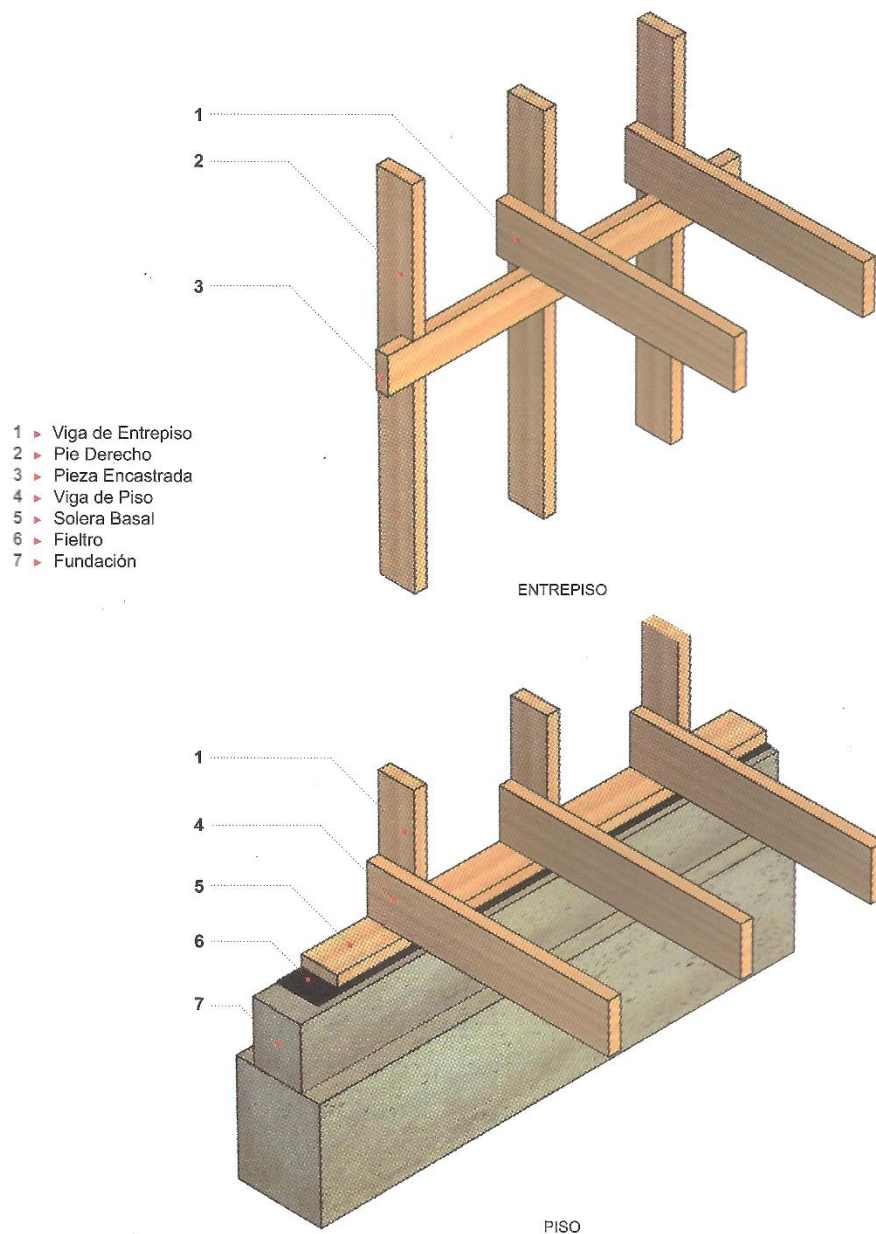


Ilustración 27. House Movers of San Francisco, by Dave Glass.

El sistema Balloon Frame se utiliza para construcciones de dos o tres niveles. Permite levantar los tabiques en toda la altura, en seguida construir el techo y posteriormente colocar los envigados y terminaciones. Salvo en el detalle constructivo, donde se muestra el entrecruzamiento de los pie derecho con las vigas de piso [17].

Sus características estructurales, se definen en una arquitectura de diafragma, donde todos los elementos adquieren importancia para el sistema, pero es en su multiplicidad de uniones donde adquiere su fuerza. Los montantes de las paredes exteriores, son continuos en toda su altura, que generalmente consiste en dos plantas.

Ilustración 28. Sistema Constructivo Baloon Frame.
Enramados de Madera,
Universidad del Bio Bio, Chile.



2.2.2 Sistema de Plataforma (*Platform Frame*)

En el sistema de plataforma, la estructura es levantada planta por planta, de manera que los niveles horizontales de los diferentes pisos actúan como plataformas, para montar los muros del piso siguiente. La direccionalidad del trabajo de flexión exige la disposición ortogonal de muros portantes, que da a lugar a la arquitectura diafragmada: elementos portantes que se traban entre sí, de manera, que lo que es arriostrado para unos, es soporte para otros. A continuación, se colocan las vigas sobre la estructura de los muros de planta baja, y con el fin de arriostrarlas y formar el siguiente plano de trabajo, se colocan los tableros, que darán lugar a la plataforma de la siguiente planta. Finalmente, se colocan las cerchas que son arriostradas por tableros, al igual que los pisos inferiores [8].

La diferencia con el sistema constructivo anterior de Baloon Frame, es que los montantes quedan interrumpidos en cada planta, lo que lo hacen mucho más beneficioso en variados sentidos, como por ejemplo presentar un mejor comportamiento frente al fuego, por existir menor continuidad entre las plantas, y principalmente por poder alcanzar alturas de más de dos plantas.

En el sistema de plataforma, se arma todo el entramado vertical y horizontal, se reviste con placa por una cara a lo menos, tanto en el plano vertical como horizontal. En este sistema, los entramados horizontales siempre van apoyados sobre una solera de amarre. La modulación de estos entramados, coincide con la repartición de los pie derecho de la estructura vertical, conformando un todo interrelacionado. Cada apoyo del envigado, irá unido por medio de dos clavos lanceros como afianzamiento a la solera basal correspondiente. Además, en el caso de tabiques exteriores, las vigas rematan en la pieza que se coloca como friso, clavadas con dos clavo de cabeza [17].

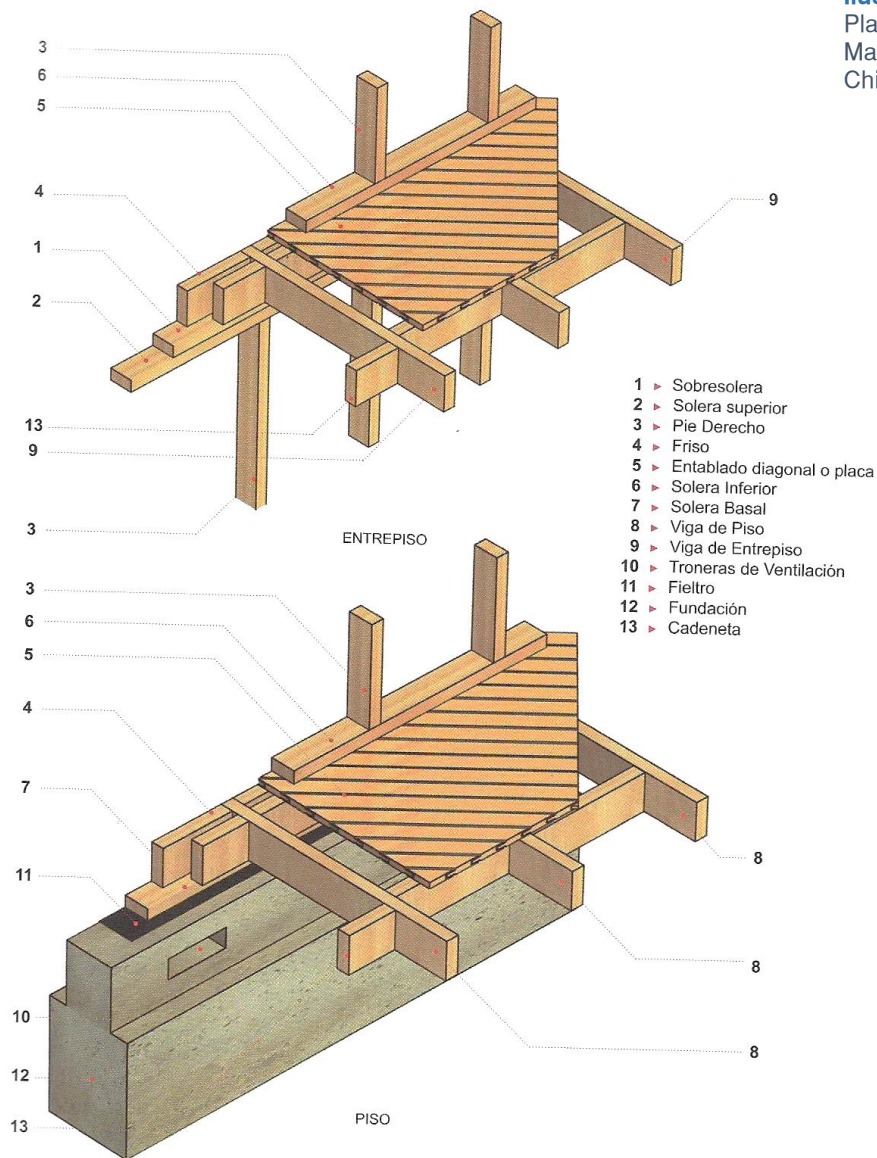


Ilustración 29. Sistema Constructivo Platform Frame. Entramados de Madera, Universidad del Bio Bio, Chile.

A modo de Resumen, se presenta la diferencia de ambos entramados, *Baloon Frame* y *Platform Frame*, que radica principalmente en la estructuración de los entramados horizontales o pisos, de tal manera que la forma de unión con los elementos verticales, determina la tipología y los detalles constructivos.

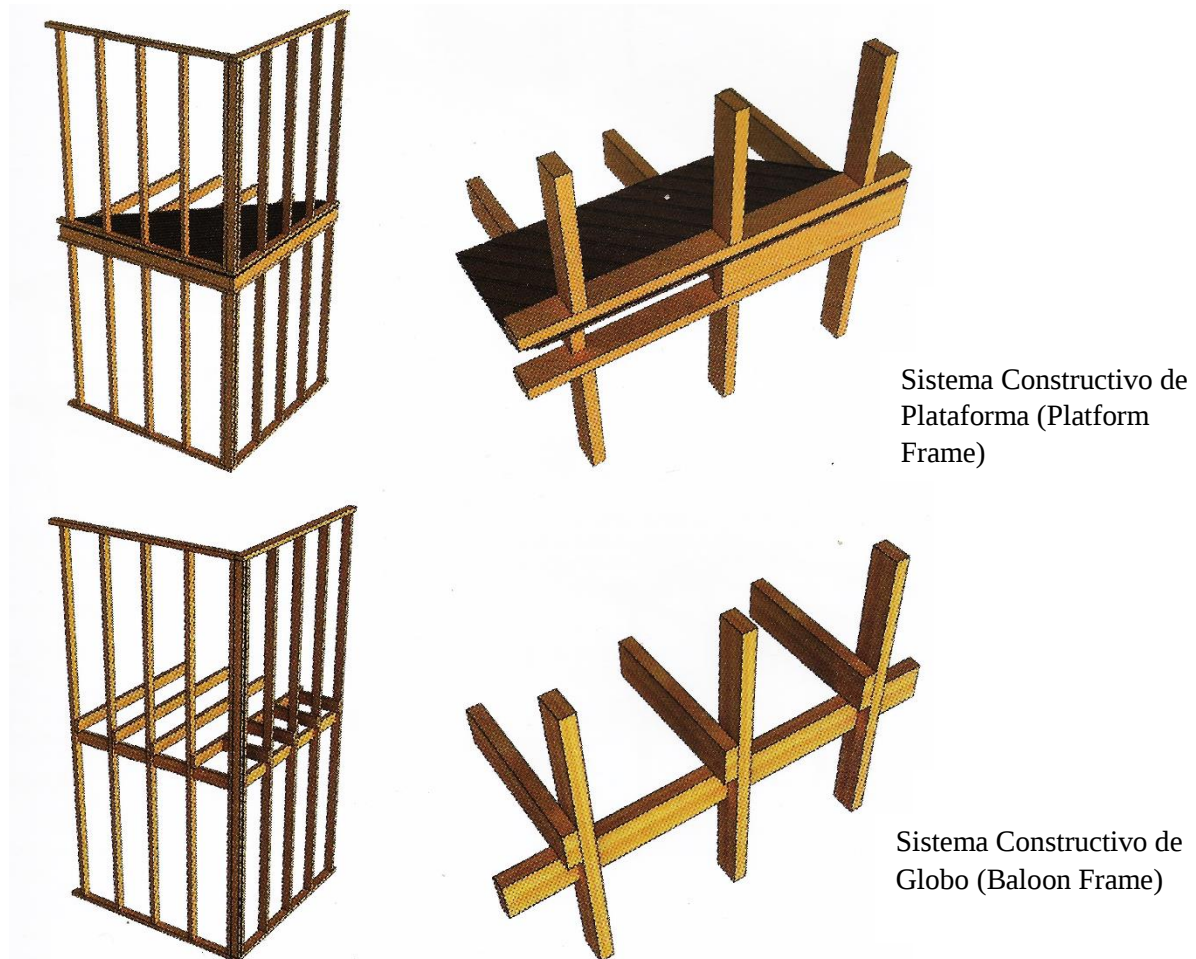


Ilustración 30. Sistema Constructivo Platform Frame y Baloon Frame. Entramados de Madera, Universidad del Bio Bio, Chile.

2.3 Entramados de Marcos Rígidos

Si bien, los marcos rígidos no se constituyen como una tipología constructiva propiamente tal, ya que corresponde a los entramados pesados, en esta investigación se mencionará de manera particular, ya que se profundizará en sus definiciones y sub-sistemas, los cuales serán implementados en la problemática a explicar posteriormente.

Como marco rígido, se entiende su composición por dos elementos verticales y uno horizontal, en este caso pilares y vigas, los cuales forman uniones rígidas en sus uniones y en sus fundaciones. Es por esto que, para ésta investigación, se clasificarán dos sub-sistemas; el de Pilar-Viga, que no contiene relleno en el interior del marco, y el de Stud Frame que se configura como muro dentro del marco rígido.

2.3.1 Sistema de Poste y Viga (*Post and Beam*)

El sistema de Poste-Viga, es un porticado de miembros muy espaciados a base de pilares y vigas de maderas de grandes dimensiones. Puede utilizar grandes escuadrías, con uniones de ensamble, siendo la estructura independiente del cerramiento exterior. Como el sistema convencional de postes y vigas de hormigón armado, éste sistema cumple con los mismos principios [8].

El actual desarrollo de las estructuras de vigas y pilares, viene dado por la evolución de la investigación y de la industria de la madera. El sistema se basa en la prefabricación total de sus piezas, que se transportan a obra donde se montan, lo que permite desarrollar proyectos de ambiciosas características [17]. Este sistema permite una unión constante con la informática, tanto en sus ensayos, como en sus conexiones, de tal manera de poder ampliar los espectros de diseño. Por esta razón será uno de los sistemas constructivos a utilizar y desarrollar en esta investigación.

El desarrollo de la madera laminada, y las nuevas tecnologías, han producido una renovación total de su concepto, como se explicará y desarrollará en esta investigación, sin embargo, se utilizará en conjunto con la base a sus conceptos estructurales, para la implementación del proyecto a madurar.



En este sistema constructivo de poste y viga, los entramados horizontales se apoyan sobre vigas maestras, que trasladan las cargas a postes o pilares, que pueden ser empotrados o rotulados, y de éstos a las fundaciones. Estos entramados, están formados por vigas de piso y/o de cielo, moduladas a una distancia de 40-70 cm, para recibir el pavimento y/o recubrimiento de cielo. Las vigas de piso, se fijan a las vigas maestras por medio de clavos o conectores metálicos. En entablado de piso, debe ser clavado o atornillado, verticalmente por encima, para lograr una unión solidaria entre el entramado horizontal y la placa, es así, como se logra una colaboración estructural entre los diferentes elementos.

Es posible diseñar los entramados como placas rígidas, capaces de transmitir solicitaciones horizontales a sólo algunos tabiques o pórticos arriostrados, permitiendo una planta libre de divisiones o con tabiques no presentes. Las distancias entre cada elemento estructural, deben estar moduladas, permitiendo una coordinación de conjunto, que conforma una cuadrícula reticulada, de ejes equidistantes de múltiplos y sub-múltiplos de ellas [17].

Ilustración 31. Tipologías de uniones para Sistema Constructivo Post and Beam. Entramados de Madera, Universidad del Bío Bío, Chile.

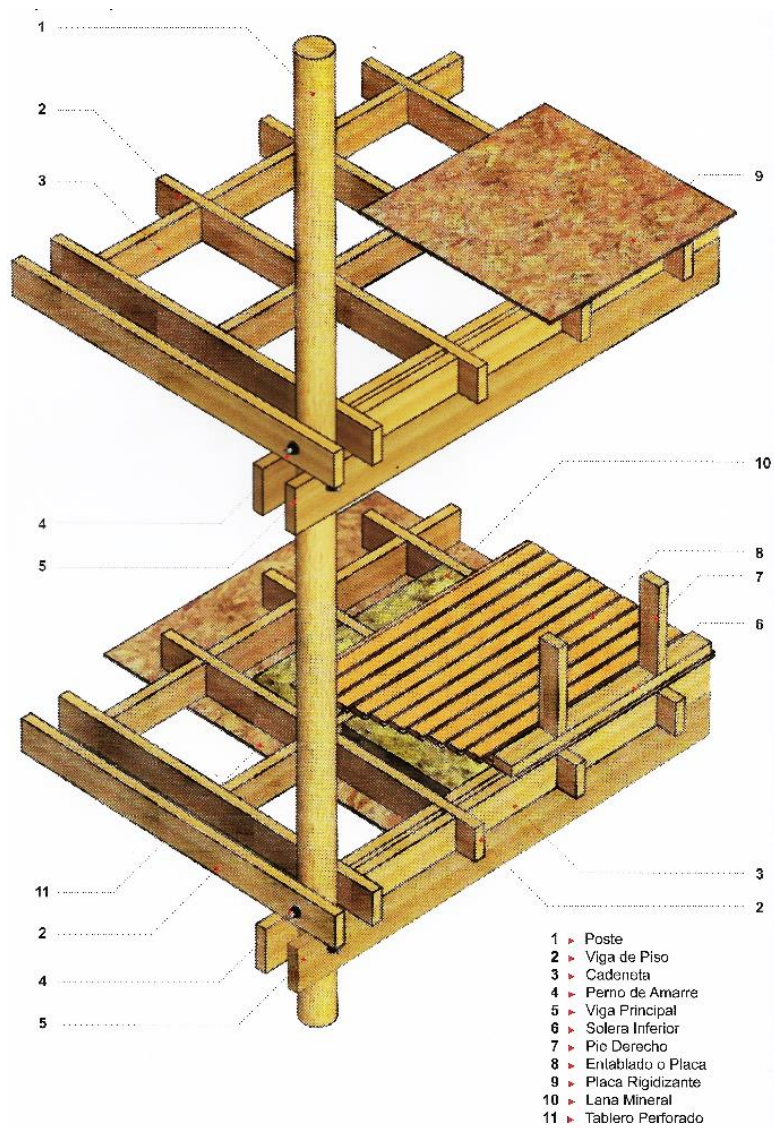


Ilustración 32. Sistema Constructivo Post and Beam. Entramados de Madera, Universidad del Bio Bio, Chile.

2.3.2 Sistema de Marco (Stud Frame)

En el siglo XIX nace un sub-sistema constructivo, complementario con los entramados pesados usado como relleno de los muros o marcos rígidos, el cual tenía como principales características construirse de una manera modular y repetitiva, y ser de bajo coste por confeccionarse con madera aserrada.

Es así, como emerge el sistema de montantes verticales o Stud Frame, el que se define como un entramado de madera de menores escuadrías que los mencionados anteriormente en los entramados pesados, pero que aún si se compone de elementos de mayor peso y tamaño que un entramado ligero. Se compone por pies derechos separados equidistantemente, que se integran por elementos individuales a la estructura entre los marcos pesados, que utilizan Timber Frame [12]. Los elementos principales van desde los 4x4" y contiene diagonales estructurales. Este sistema constructivo se separa en dos ítems a diseñar, los entramados o elementos verticales y los horizontales.

a) Entramados Verticales:

- Pie Derecho = 4x4"
4x6"
6x6"
- Soleras Inferiores y Superiores = distancias de 40 a 70 cm
- Diagonales /Riostras = Varían según los vanos, por lo que se establecen diseños estándar de muro.

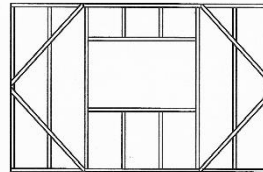
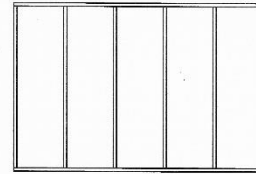


Figura 17:
Distribución de transversales
y diagonales

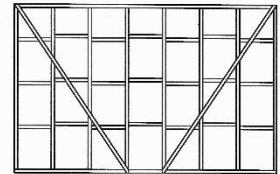


Figura 18:
Arrostramiento Ineficiente

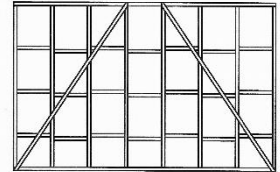


Ilustración 33. Tipologías de Riostras. Entramados de Madera, Universidad del Bío Bío, Chile.

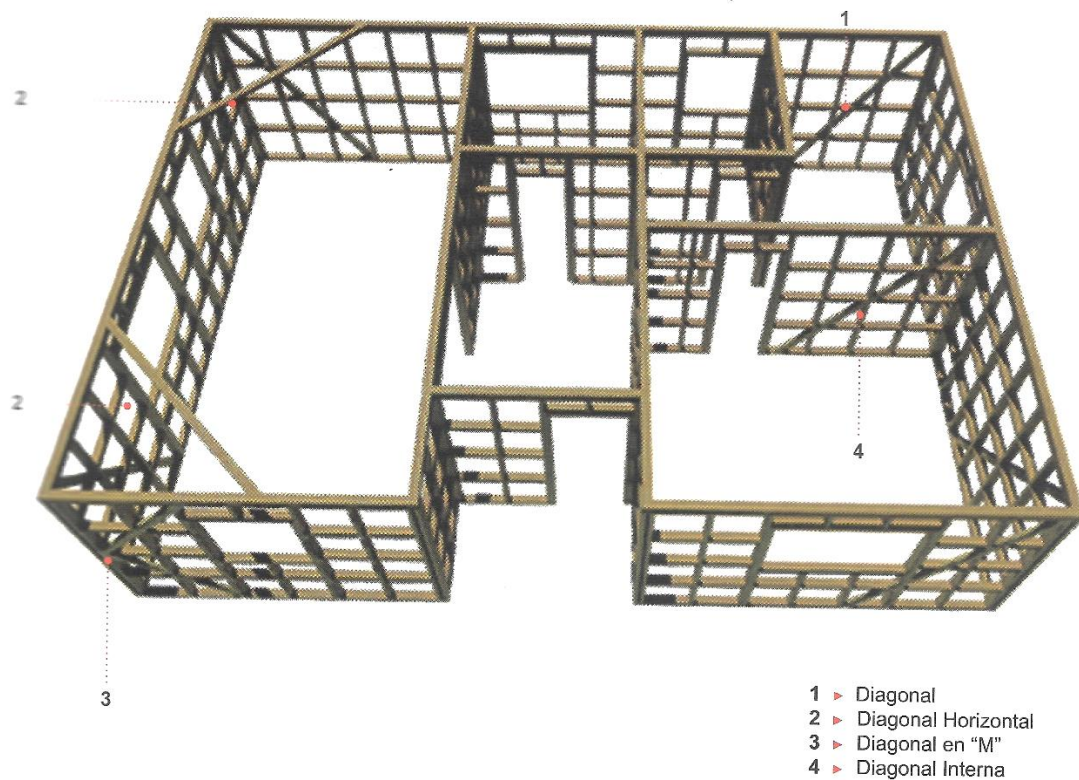


Ilustración 34. Tipologías de Muros. Sistema Constructivo Stud Frame. Entramados de Madera, Universidad del Bío Bío, Chile.

b) Entramados Horizontales:

- Viguetas = Se ubican sobre las soleras, y van desde los 3 a los 6 m de largo. Se separan en tramos desde los 40 a los 60 cm.
- Entablado de Madera = Cerramiento y relleno de piso.

- Cerchas = Dimensiones de acuerdo al diseño.

Como se puede inferir, los tipos de entramados en madera se dividen principalmente por las secciones de sus piezas y el uso estructural para el cual están diseñados. Es por esto, que para esta investigación solo se considerarán los entramados pesados o de grandes escuadrías como estructura primaria, y los entramados ligeros o de menor escuadría para las estructuras secundarias o terciarias según corresponda.

Cabe destacar, que esta división se realiza de acuerdo a los requerimientos propios de estructurar una edificación de mediana altura, por lo que el funcionamiento y desarrollo debe considerar todas las características estructurales que esto conlleve y que se explicarán con más detalle a continuación.

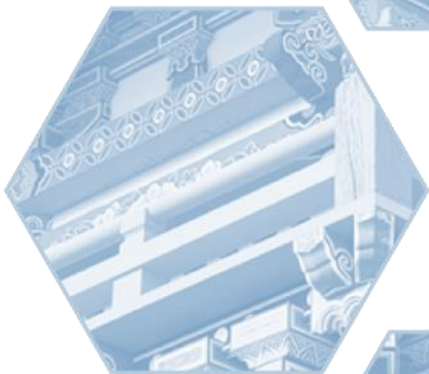


3

CONSTRUCCIÓN EN MADERA: EDIFICACIÓN DE MEDIANA ALTURA



3.1 Construcción de edificación de mediana altura con madera en el mundo



3.2 Construcción de edificación de mediana altura con madera en Chile

Capítulo 3

3. Construcción en Madera: Edificación de mediana altura.

Con el objetivo de comprender los beneficios y limitaciones de los sistemas constructivos descritos en el capítulo anterior, el presente capítulo desarrollará un análisis comparativo de dichos sistemas, basado en precedentes de arquitectura en madera de mediana altura.

Igualmente, como se explica en el capítulo anterior, los sistemas constructivos en madera tienen limitaciones estructurales debido a las secciones a utilizar y al peso que pueden sostener. Es por esto, que sólo algunos permiten la construcción de edificaciones sobre los 3 niveles de altura, considerando la resistencia del peso completo de la edificación. En consecuencia, en el desarrollo de ésta investigación, solo definiremos como sistemas constructivos en madera a utilizar para la estructura primaria, los siguientes:

1. Estructuras de Paneles y Placas
 - 1.1 Madera Laminada
 - 1.2 Madera Contraplacada
2. Entramados Pesados
 - 2.1 Box Timber
3. Sistemas de Marcos Rígidos
 - 3.1 Sistema de Poste y Viga

Así también, para una estructura secundaria y/o terciaria se utilizará el sistema constructivo en madera más común, pero con las adaptaciones correspondientes al proyecto a explicar posteriormente, como son los entramados ligeros, específicamente el sub-sistema de Balloon Frame.

Considerando lo anterior, los precedentes que se presentarán a continuación, tendrán una base constructiva correspondiente a estos sistemas y/o propuestas de diseño y construcción que utilicen más de un sistema, de tal manera que no solo se consideren como precedente, sino también, como ejemplificación e introducción del objetivo de esta investigación.

Las estructuras de madera a lo largo de la historia, específicamente las edificaciones de mediana altura, han existido durante siglos, es por esto que, se determina distinguir solo las que corresponden a edificaciones sobre los 3 niveles. Hace 1400 años aproximadamente, las pagodas en Japón, han sido un hito de construcción de madera en altura, construyendo edificaciones de hasta 19 niveles y que aún se mantienen intactas, considerando condiciones sísmicas y climáticas de gran envergadura [18]. Hoy en día, varios países de todo el mundo tienen una historia de construcción en altura de edificios de madera, de distintas tipologías y sistemas constructivos. Las estructuras pesadas de madera, han representado los últimos 100 años, es por esto, que el énfasis constructivo y de detalles técnicos son tan relevantes en estos tiempos. En 2008, el proyecto Stadthaus en Londres, que se explicará con más detalle posteriormente, fue el impulso de la continua innovación en la tipología constructiva de Mass Timber o madera masiva, evidenciando en propuestas arquitectónicas, las características estructurales y constructivas de la madera ingenieril. Es de esta forma,

que actualmente existen variadas edificaciones con estas características que han logrado hasta los 16 niveles [18].

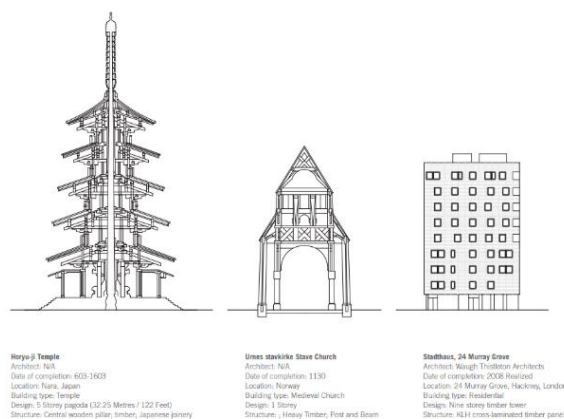


Ilustración 35. Edificaciones en altura de madera.
THE CASE FOR Tall Wood BUILDINGS. Michael Green.

Actualmente, el mayor desarrollo de la construcción en altura en base a madera se concentra en países de Europa y Canadá, ya que, son los países que están comercializando los productos de madera ingenieril, por lo que es de fácil acceso y se incentiva la construcción con productores de los lugares donde se construirá. Países como Finlandia solo permite edificios de madera de 3 niveles, o Austria prohíbe las viviendas de madera por encima de los 5 niveles.

En el caso de Chile, aún existe un gran desconocimiento de los nuevos materiales en base a madera, o aplicaciones estructurales, ya que solo se han integrado al país aproximadamente hace 1 o 2 años, y aún se desarrollan investigaciones de su funcionalidad estructural y constructiva.

3.1 Construcción de Edificación de mediana altura con madera en el Mundo

The Portland Observatory (1807)

Munjoy Hill, Lemuel Moody's

Sistema Constructivo: Timber Frame

El Observatorio de Portland, fue construido con el fin de ser una torre de señalización Marina, y diseñado por un capitán de barco, lo que conlleva a utilizar sistemas constructivos con diseños marítimos. La torre completa tiene una altura de 26.21 m (86 ft), y está diseñada como un octágono de paredes inclinadas a 8°. Su base no se encuentra físicamente anclada, es decir, se mantiene apoyada mediante 122 toneladas de grandes bloques de granito, los cuales se encuentran apilados dentro de los travesaños y vigas. Su estructura se configura como un perímetro radial, compuesto por 8 postes inclinados de 19.8 m de alto y un área basal de éstos, que va desde los 4.26 m² en su parte inferior, hasta los 3.04 m² en la punta más alta. Por otra parte, se encuentran 8 vigas que



Ilustración 37. Sistema Estructural. Restauración 1939 TIMBER FRAMING 2011.

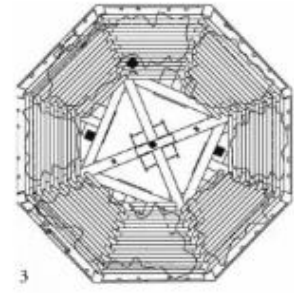


Ilustración 36. Aproximación y adaptación de vista en Planta. TTL Architect 1999.



Ilustración 38. The Portland Observatory. TIMBER FRAMING 2011.

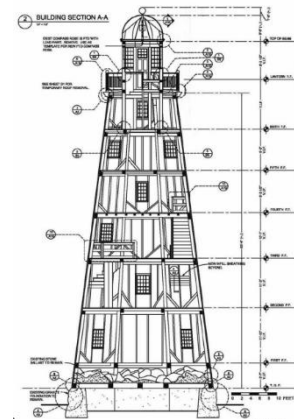


Ilustración 39. Aproximación y Adaptación de Corte Sistema Estructural. TTL Architect 1999.



Ilustración 40. Detalles Constructivos The Portland Observatory. TIMBER FRAMING 2011.

unen los postes, formando anillos de unión, y 8 vigas radiales, que unen los pisos y/o techumbre con la estructura de postes y vigas (Ilustración 38-39). Como elementos secundarios, se encuentran las viguetas de 3x4" y algunos pequeños parches triangulares de ¾". Las Vigas secundarias van ubicadas sobre los anillos de la estructura primaria, lo que fue uno de los motivos de perder estructuración en vigas perimetrales y peso extra en los pilares principales, los que tuvieron que ser restaurados posteriormente (Ilustración 40-superior). El observatorio actualmente no se encuentra terminado en su interior, lo que permite ver con claridad su estructura y ensambles de carpintería, que se caracteriza principalmente por las grandes escuadrías de los elementos constructivos y las uniones de carpintería de armar, como son las uniones de clavija o caja y espiga, y los de espera con cajeadado. Además, ésta ha sido restaurada en 2 ocasiones:

- 1939: Reemplazo de la mitad de los anillos interiores y se carbonizaron.
- 1999-2000: Eliminación de todas las tablas de revestimiento y tratamiento insecticida.

Algunos de los materiales utilizados para su construcción y restauración son, Pino Blanco de Este, Linterna de Roble principalmente para la estructura de cubierta y roble blanco de 5.79 m de largo para los postes de cubierta. Finalmente, en 1972 fue integrada al "National Register of Historic Places", y en 2006 pasó a ser Monumento Nacional y seleccionada como un hito constructivo por la "American Society of Engineers" [19].

Stadthaus (2009) [18]

24 Murray Grove, London, UK.

Waugh Tristleton Architects

Sistema Constructivo: Mass Timber, CLT.

Este edificio construido 100% en Madera, es el pionero de la construcción con Mass Timber o madera masiva, por lo que se ha convertido en un ícono en todo el mundo. Su programa principal es el de vivienda, por lo que uno de los desafíos principales en el diseño, era la intervención en un sector muy transitado y en su mayor parte de oficinas, por lo que se debía pensar en la disminución de ruido y la aislación térmica propia del emplazamiento [18].

Este edificio consta de 9 Niveles, en los cuales se concentran 29 departamentos, diseñados como espejos desde Oriente a Poniente. Su estructura se basa en la extrusión de una planta de 17 x 17 m, creando un sistema completamente modular, y por lo mismo, con la capacidad de ser totalmente prefabricado. Es así, como fue ensamblado en su totalidad de manera in-situ, demorando solo 9 semanas en su montaje y construcción.



Ilustración 41. Vista Interior proceso constructivo. Plataforma de Arquitectura. Will Pryce.



Ilustración 42. Vista real edificio Stadhaus. Plataforma de Arquitectura. Will Pryce.

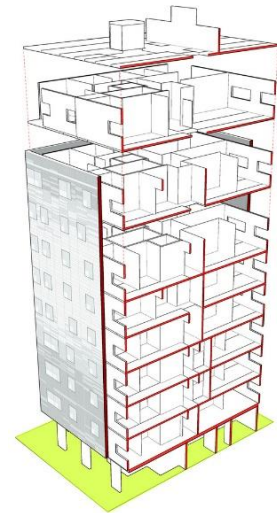


Ilustración 43. Axonométrica de Montaje insitu. Plataforma de Arquitectura.

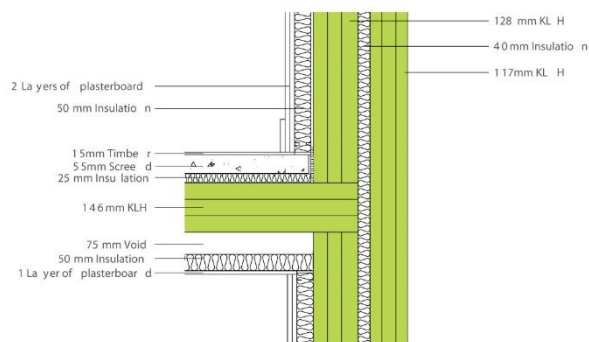


Ilustración 44. Detalle unión de Paneles CLT y fundaciones. Plataforma de Arquitectura.

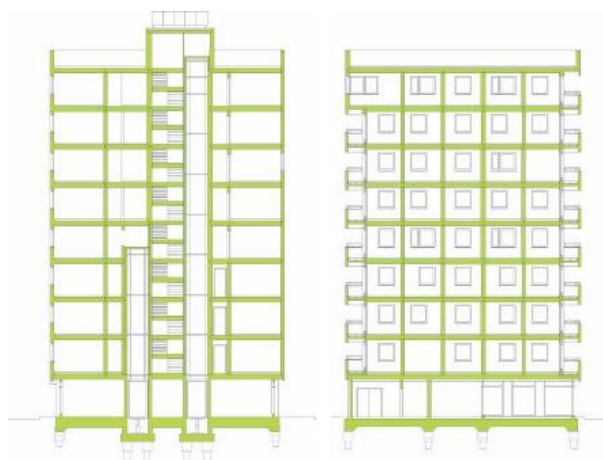


Ilustración 45. Corte Estructural Edificio Stadhaus. Plataforma de Arquitectura.

La característica principal de esta edificación, es el material que se utilizó para su construcción, los paneles de CLT, los cuales fueron diseñados por KLH de Austria, considerando madera de abeto, y con propiedades estructurales suficientes para construir los 9 niveles exigidos [20].

Con este precedente, se puede determinar claramente, las potencialidades de la madera ingenieril, donde no solo puede alcanzar grandes alturas, sino que también mejora los tiempos y costos de construcción, sin sacrificar el diseño y la calidad espacial y térmicas.

Otras de las características muy relevantes en este tipo de construcción, es reducir el impacto ambiental de la arquitectura. Construyendo edificios que reduzcan el impacto en el planeta esencialmente, no solo a través del uso de la energía necesaria en la vida del edificio, sino también, en la energía gastada al producirlo.

Uno de los ejes de investigación más importantes actualmente, es el uso de la madera en construcción para favorecer todos los puntos sustentables anteriormente mencionados, evitando así, seguir contaminando con construcciones de hormigón y acero.

Centro de Innovación y Diseño en Madera WIDC (2014) [17]

Prince George, British Columbia.

Michael Green Architecture

Sistema Constructivo: Sistema Mixto de Mass Timber + Hormigón.

El edificio fue proyectado para la Universidad de Northern British Columbia, como espacios de estudio y experimentación en madera. Para esto considera los 3 niveles superiores como programa de oficinas y los niveles inferiores como talleres de diseño. El Edificio consta de 8 pisos con un total de 29.26 m de altura, construido en base a un sistema de Pilar-Viga, pero con elementos de madera ingenieril.

Su estructura primaria, se basa en postes de 14x14 ½” para los niveles inferiores, y postes de 12x11 ½” para los niveles superiores, por otro lado, se compone de vigas que van desde los 2 a los 16 mm de espesor. Su principal característica, es que su estructuración es un sistema mixto de madera masiva, configurándose de distintos elementos constructivos, basados de pino de abeto colombiano británico, los cuales son:

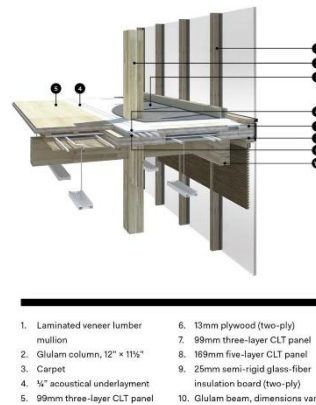


Ilustración 46. Detalle Constructivo de unión con muro cortina. Revista Architect, 2015.



Ilustración 47. Fotografía interior de edificio, primer y segundo nivel. Revista Architect, 2015.

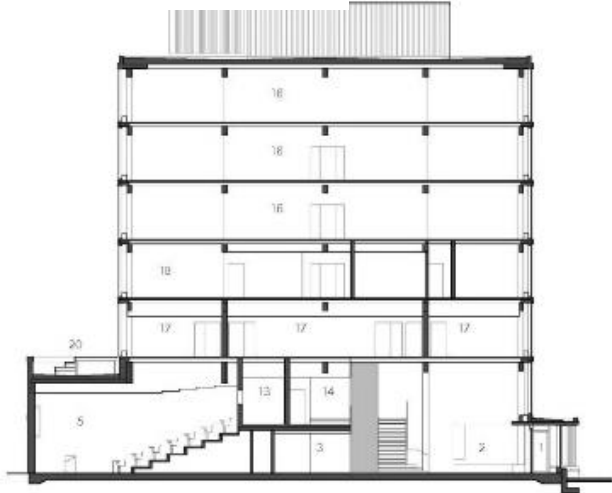


Ilustración 48. Corte estructural edificio. Revista Architect, 2015.

- Chapa Laminada (LVL)
- Madera Laminada Cruzada (CLT); 4, 6 ½, 9 ½” de espesor para paredes, escaleras y caja ascensor.
3, 5 y 7 capas para pisos y techos
- Madera de Filamento Laminada (LSL)
- Madera Laminada Encolada (GLULAM)

Finalmente, cuenta con una losa de hormigón como base de fundación, y uniones de acero “Cola de Paloma”, lo cual se patentó como diseño del arquitecto, específico para el proyecto [21].

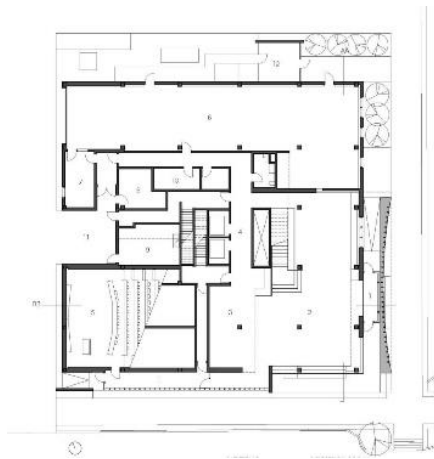


Ilustración 51. Planta Primer Nivel.
Revista Architect, 2015.

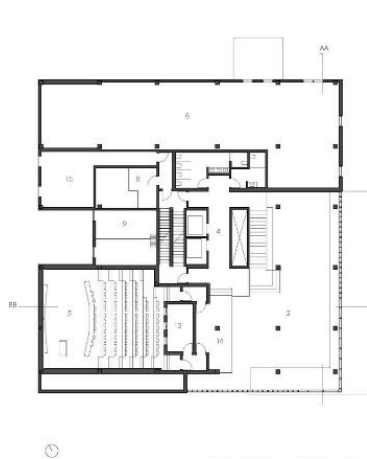


Ilustración 50. Planta Piso Medio.
Revista Architect, 2015.

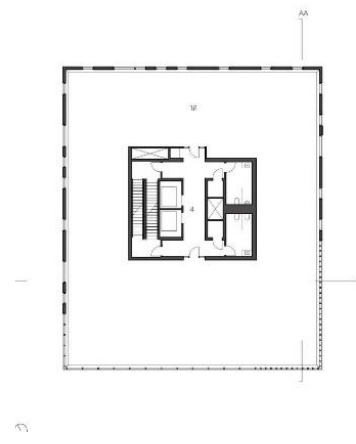


Ilustración 52. Planta Quinto Nivel.
Revista Architect, 2015.



Ilustración 49. Proceso Constructivo. Revista Architect, 2015

Edificio Mjøstårnet (2017-2019) [22]

Lago Mjøsa, Noruega.

Arthur Buchardt

Sistema Constructivo: Mass Timber + Hormigón.

Este edificio ha sido uno de los focos más importantes en los últimos años, en cuanto a construcción y sustentabilidad, principalmente por su sistema constructivo mixto, entre madera y hormigón, y por el uso de recursos locales, proveedores locales, y materiales de madera sostenible. Se emplaza frente a un lago de gran demanda, por lo que su diseño incorpora una distribución multiprograma, que va desde la privacidad de la vivienda, hasta oficinas y espacios de uso público.

El Edificio de 11.300 m² consta de 18 Niveles con un total de 81 m de altura, de los cuáles desde el segundo a 11avo nivel está construido con madera, con el sistema constructivo de Trä8 Molven (Ilustraciones 54 a 56), y desde el 12avo al 18 nivel esta de hormigón y vigas de madera laminada. Se aproxima un uso de 2.600 m³ de madera en su estructuración.



Ilustración 54. Render Proyecto. Mjøstårnet -Construction of an 81 m tall timber building | Rune Abrahamsen.



Ilustración 53. Sistema Estructural Trä8 Floor. Mjøstårnet -Construction of an 81 m tall timber building | Rune Abrahamsen.



Ilustración 55. Tipico Sistema Estructural Trä8. Mjøstårnet - Construction of an 81 m tall timber building | Rune Abrahamsen.

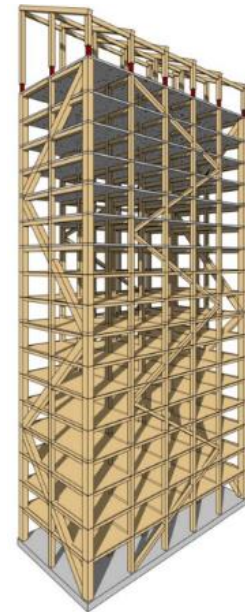


Ilustración 56. Sistema Estructural. Mjøstårnet - Construction of an 81 m tall timber building | Rune Abrahamsen.



Ilustración 57. Planimetría previa del edificio. Mjøstårnet - Construction of an 81 m tall timber building | Rune Abrahamsen.



Pictures from the start of the assembly in September 2017

Ilustración 58. Inicios de Ensamblado in-situ, septiembre 2017. Mjøstårnet - Construction of an 81 m tall timber building | Rune Abrahamsen.

Su estructura Primaria, se conforma del sistema constructivo de Poste- Viga, donde los primeros van desde los 725x810 mm² a 625x630 mm², y las vigas van desde los 395x585 mm² a los 395x675 mm². Por otra parte, en su estructura secundaria, compuesta por paneles de CLT, solo funcionará para cargas verticales, y se establecerá en muros de ascensores y escaleras, los que tienen una altura de eje de 74 m. Las fuerzas máximas de compresión son de hasta los 11.500 Kn resistidas, y la resistencia de las fuerzas a tensión son de hasta 5.500 Kn.

Para su exterior se proyectaron vigas de Glulam, y respectivos componentes de fachadas, la cual es anclada a la estructura primaria con conexiones exteriores, para protegerla del desgaste climático.

Finalmente, su fundación de Hormigón es de 17 x 37 m y su estructuración también cuenta con diagonales de hasta 625x990 mm². Las cerchas serán las encargadas principales de manejar las fuerzas globales (horizontales y verticales), de tal manera de brindar la rigidez final del edificio [22].

Pagoda Sakyamuni (1056)

Templo Fogong, Ying, China

Monje Bhikkhu Tian Hui

Sistema Constructivo: Poste-Viga + CA

La Pagoda Sakyamuni es un ícono de la construcción en altura en base a madera y carpintería de armar, ya que es la pagoda más antigua de China con uniones sin ningún clavo. Este edificio ha resistido 7 terremotos y 1 guerra en lo largo del tiempo [23].

La Pagoda está construida con tres materiales diferentes. En su fundación se encuentra un podio de piedra de 4 m de altura, en el cual se unen los elementos estructurales de madera a través de bisagras esféricas. En segundo lugar, se encuentra toda la estructura del edificio, constituida por madera de alerce y muros de entramado con interior de barro. Y finalmente, en su techumbre se encuentra una aguja de hierro de 10m, que le brinda la altura brinda la altura final a la torre.

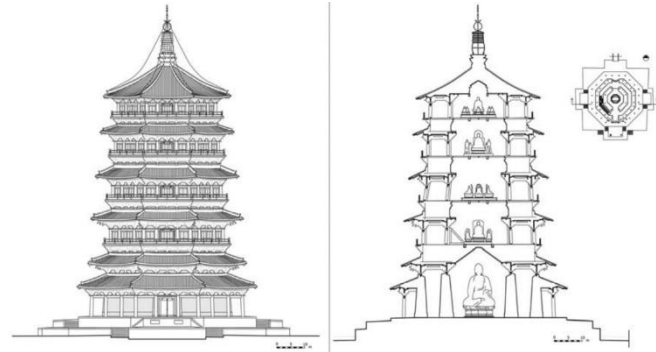


Ilustración 59. Elevación Sur y corte transversal. Pagoda Sakyamuni. Structural Analysis of Historical Constructions.



Ilustración 61. Pagoda Sakyamuni. Futuro Pasado, 2006.

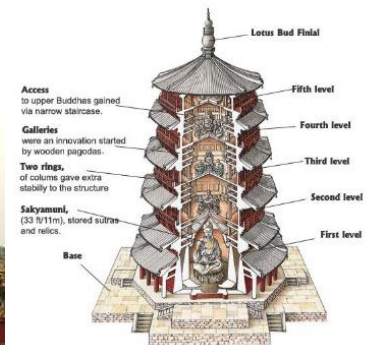


Ilustración 60. Desglose programático de la Pagoda Sakyamuni. Web.

La Pagoda consta de 8 niveles, que determinan una altura final de 67,31 m. Su estructura se basa en módulos octogonales de 30 m de diámetro en el más bajo, los cuáles se dividen en 2 partes, 5 módulos principales y 4 módulos

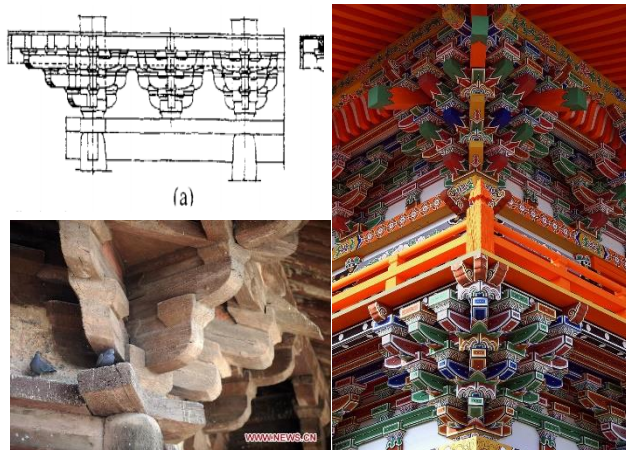


Ilustración 63. Detalle Duogong.

Ilustración 62. Dougong Pagoda Sakyamani. Wikipedia.

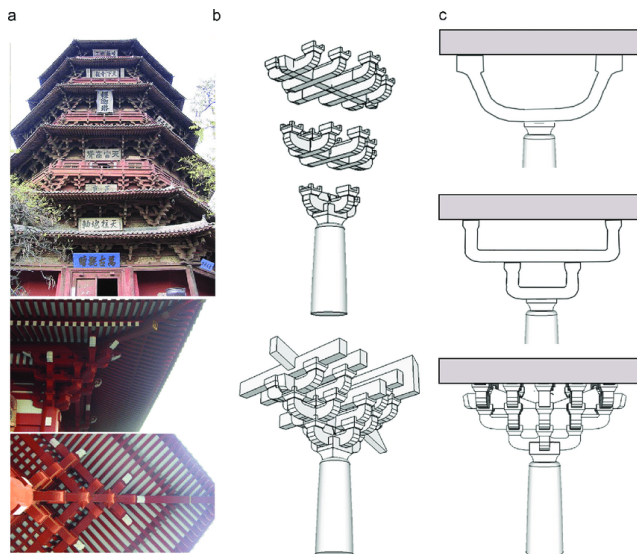


Ilustración 64. Detalle diseño uniones de duogong, Pago-da Sakyumani. researchgate.

secundarios. Estos módulos disminuyen proporcionalmente a medida que aumenta la altura, para controlar también las longitudes de los lados de cada tramo.

Los módulos estructurales se configuran como un anillo de columnas que sostienen los aleros más bajos o vigas principales, como estructura primaria, y luego se une con una estructura secundaria que cuenta con columnas de sujeción. En esta estructura primaria, se ubican los “duogong”, el punto de innovación de la construcción de esta pagoda.

Los Duogong son un único elemento estructural que surge de la intersección de dos ménsulas de madera, y se ubican sobre los pilares sosteniendo las vigas. La pagoda cuenta con 416 Duogong, unidas de 54 formas diferentes según se requiriera. Las ménsulas soportan vigas principales u otros gong, y su principal función es reducir la tensión de las vigas a los pilares. Además, tienen la propiedad de ser estructuras elásticas, resistiendo los daños causados por los terremotos [24].

Finalmente se han realizado distintas reparaciones, principalmente por los daños causados por la guerra Sino- Japonesa (1937-1945).

3.2 Construcción de Edificación de mediana altura con madera en Chile

Independiente de todos los sistemas constructivos en madera existentes en la actualidad, el primer sistema constructivo en madera que arribó en Chile fue el sistema de entramado, que se ha ido desarrollando y actualizando en los años posteriores. En efecto, a través de un proceso de transculturación, principalmente en la región de Valparaíso, por tratarse de un puerto, fue mutando con las innovaciones constructivas propias de la segunda década del siglo XIX y autóctonas del lugar. Las cuales, a través de las condiciones topográficas y climáticas dieron pie a una nueva “tipología arquitectónica”, que como definición, según Marina Waisman [12] es: *“Tipo, no se concibe como una unidad purista en forma y estilo, sino el resultado de una serie de ejemplares que han sido modificados y han evolucionado en el tiempo, como “respuesta a un conjunto de exigencias ideológicas o religiosas o prácticas” (Waisman Marina (1972). La estructura histórica del entorno)*. Esta nueva tipología arquitectónica, ahora propia de la región de Valparaíso, actualmente es patrimonio arquitectónico de la ciudad, siendo catalogada por la UNESCO como Inmuebles de Conservación Histórica, a todas las edificaciones que presenten sus características constructivas.

Debido a que información puntual de los arquitectos y/o constructores de esa época aún se encuentra en investigación, no es posible tener una referencia exacta de los métodos y procedimientos constructivos, de tal manera que en esta investigación solo se abordará los desarrollos y el material que han sido verificados en la actualidad. En este marco se puede aseverar, que producto de la estrecha relación de Chile con los países desarrollados, es que Valparaíso se convirtió en el acceso principal de materiales de construcción y técnicas foráneas de los constructores de la época. Los cuales, con o sin previo conocimiento de los sistemas constructivos a desarrollar, comenzaron a realizar las modificaciones estructurales respectivas, que se consideraban correctas. Es por esto, que no se confirma aún, la tipología diseñada para algunas viviendas de Valparaíso [12].

Por otra parte, existen asentamientos en todo Chile, que también son claros ejemplos de la construcción en madera, no solo para viviendas de 2 niveles, sino que también para edificios de mediana altura. Uno de estos ejemplos, son los edificios habitacionales de los obreros en el campamento minero industrial Sewell, ubicados en la cordillera de

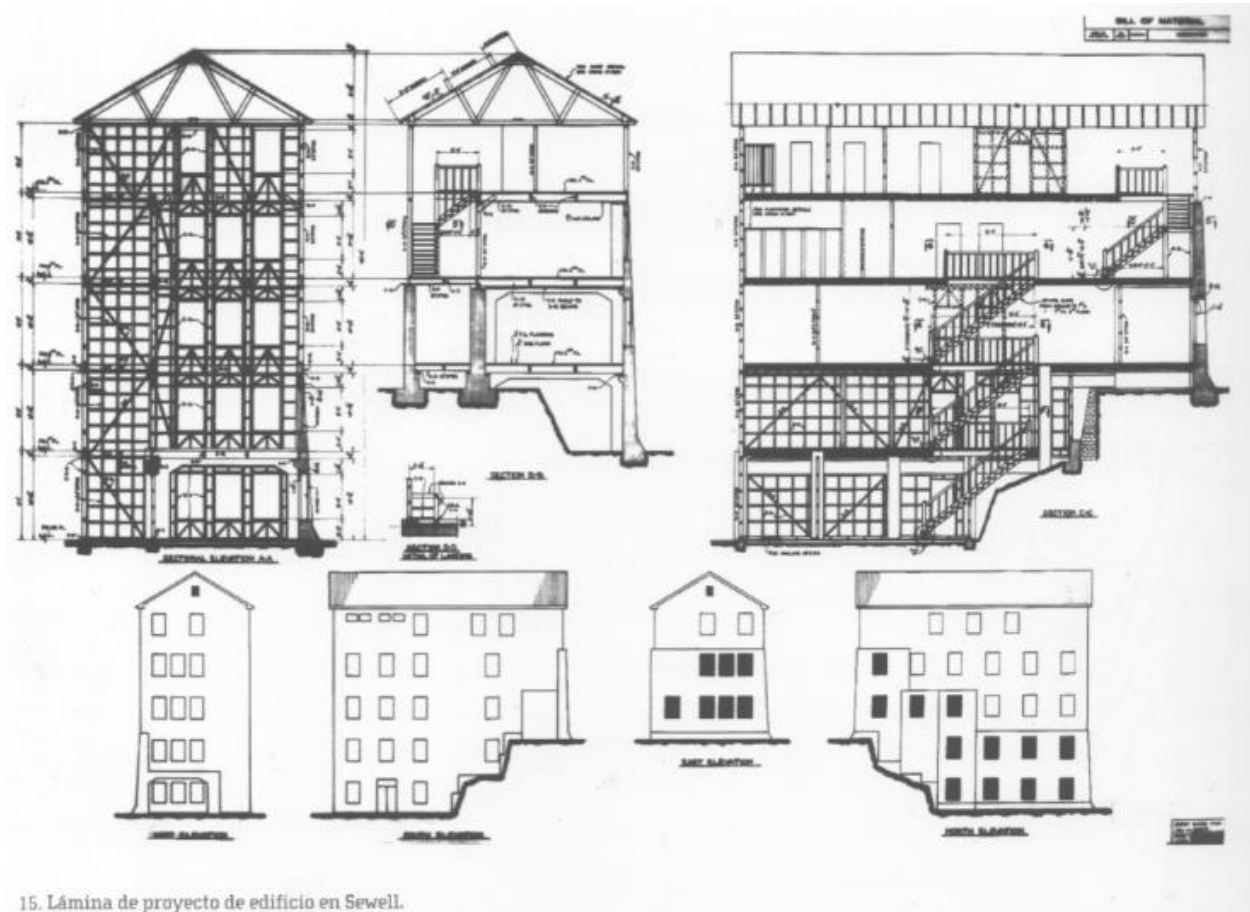
Rancagua a 2.100 m.s.n.m. Estos edificios, iban desde los 5 hasta los 9 niveles, y fueron construidos con madera de pino Oregón importadas desde California, a través de sistemas constructivos como el Balloon Frame o Platform Frame. En su mayoría, los edificios de Sewell son de diseño ortogonal, pero lo más relevante es su fundación, ya que se tuvieron que adecuar a las pendientes del emplazamiento, lo cual fue posible gracias a la libertad de diseño de los sistemas constructivos en madera [12].



Ilustración 65. Comparación campamento Sewell, 1910-actualidad. Garcés Feliú, E., Cooper Apablaza, M., & Baros Townsend, M. (2007)

Al igual que las construcciones en madera de Valparaíso, el mayor desafío constructivo de las viviendas en Sewell, era el diseño en pendiente que se debió enfrentar, teniendo en muchos casos, que realizar fundaciones escalonadas adaptándose a las condiciones propias del terreno. Es así como los sistemas constructivos de entramado brindaron una rápida solución, siendo el más utilizado, el sistema de entramado ligero de Platform Frame, donde se construye una plataforma rígida por nivel para que las cargas verticales deban coincidir con el mismo plano para la disposición de los pies derechos con los envigados, es decir, deben ser coplanares.

Para la rigidización ante fuerzas horizontales (viento, sismo) sobre los elementos verticales o diafragmas se resuelve con el uso de diagonales, de la misma sección maderera que los pies derechos. Sobre los entramados verticales se han resuelto con placas de contrachapado u otros materiales similares.



15. Lámina de proyecto de edificio en Sewell.

Ilustración 66. Cortes de los edificios que muestran el sistema de Platform Frame. d. Garcés Feliú, E., Cooper Apablaza, M., & Baros Townsend, M. (2007)

Por otra parte, en Valparaíso también se presentan algunas edificaciones de mediana altura construidas con madera, además de que tienen un valor agregado, por presentar en muchas de ellas uniones carpinteras sin intervención de acero. Se seleccionó un listado de las edificaciones más relevantes dentro de la región, como fundamento estructural de las construcciones en madera:

Avenida Gran Bretaña N° 761., Valparaíso, Chile.

- Arquitecto: Carlos Claussen.
- Año Construcción: 1912.
- Sistema Constructivo: Balloon Frame con muros rellenos de adobillo.

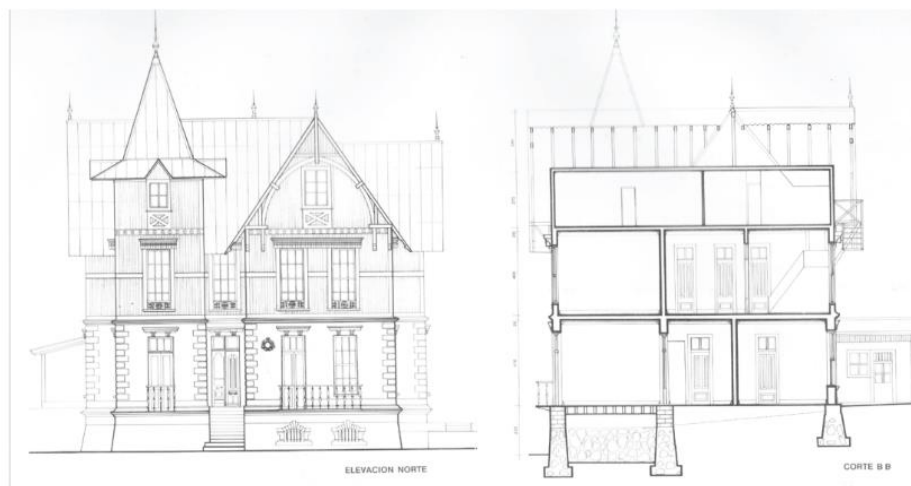


Ilustración 67. Casa Av Gran Bretaña 761. Los Entramados tradicionales de madera en los cerros Alegre y Concepción. Wasiberg M. (1988). *Casas de Playa Ancha*.

Urriola N° 495, Cerro Concepción, Valparaíso, Chile.

- Arquitecto: Desconocido.
- Año Construcción: 1909 aprox.

- Sistema Constructivo: Sistema Mixto – Piedra, Albañilería y Entramados.

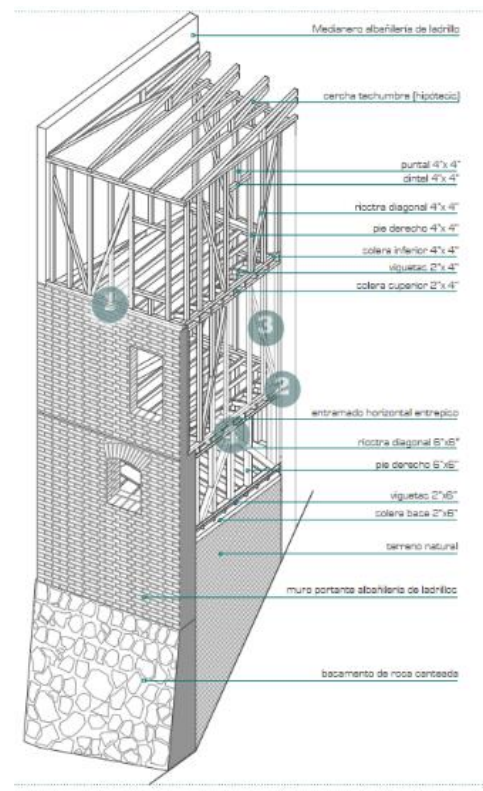


Ilustración 68. Casa Urriola 495. Fuente: Los Entramados tradicionales de madera en los cerros Alegre y Concepción. María Belén Jiménez Ramírez.

Lautaro Rosas N° 558, Cerro Alegre, Valparaíso, Chile.

- Arquitecto: Desconocido.
- Año Construcción: 1909 aprox.
- Sistema Constructivo: Sistema Mixto – Albañilería y Entramados.

Actualmente, se están realizando algunos proyectos de edificación en madera de mediana altura con sistemas constructivos de entramados y de paneles CLT. En éstos, se está incorporando nuevos materiales al país, no solo como importación, sino que también como fabricación, e innovando en la construcción de edificaciones aún más altas construidas con madera. Es así, como se realizó un estudio de los casos de actualidad, y que responden a la problemática de construcción de edificaciones de sobre los 3 niveles.

Torre Peñuelas (2018)

Reserva Nacional Lago Peñuelas, Valparaíso

Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC-Corma)

Sistema Constructivo: Entramado Ligero + ATS

La Torre Peñuelas se convirtió en la torre más alta de madera en Latinoamérica, alcanzando los 20 m de altura con 6 niveles de uso programático mixto. Su locación, se determina de manera estratégica en una carretera muy concurrida y con características climáticas costeras [25].

La torre fue construida con un objetivo experimental, donde todos los niveles tienen funcionalidades diferentes:

1° Nivel: Corresponde a un nivel de Showroom, donde se exhibirá a los visitantes los principales objetivos del proyecto, el cual incluye como temas principales la sustentabilidad y la construcción en altura con madera.

2°, 3° y 4° Nivel: Estos tres niveles corresponden a la base del proyecto, la investigación, donde a través de sensores, se mide los índices de humedad, temperatura, corrientes de aire, nivel de luz, flujos de aire y ondas sísmicas que

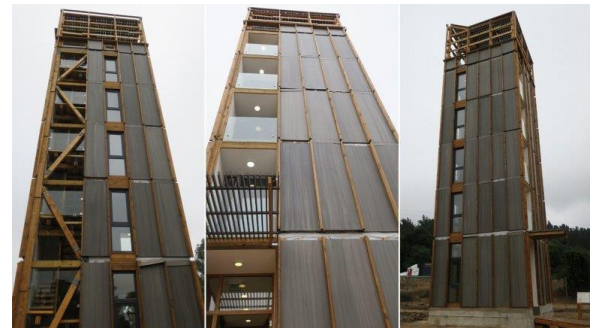


Ilustración 71. Torre Peñuelas. Diario las Américas.

Ilustración 70.
Detalle programático,
Torre Peñuelas.
Universidad Católica
de Chile.

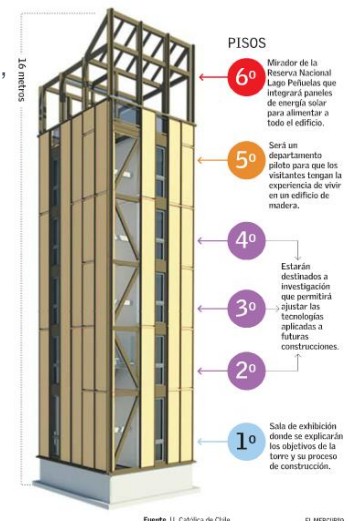




Ilustración 72. Axonométrica y corte estructural, Torre Peñuelas. CIM-UC.



Ilustración 73. Detalle sistema constructivo Torre Peñuelas. researchgate.

afectan a la Torre. Todos estos sensores, están conectados mediante internet, a una estación meteorológica que mide las variables durante un período de 18 meses.

5° Nivel: Corresponde a un departamento piloto, el cual es un home-studio de 18 m² con las características necesarias para habitar y vivirlo de manera experiencial.

6° Nivel: Este corresponde a un nivel abierto, que corresponde a un mirador hacia la reserva Peñuelas de Conaf que, junto con ser un punto de atractivo turístico, también es la base de instalación de los paneles solares para el abastecimiento de energía a la Torre [25].

Su sistema constructivo se basa en módulos prefabricados, durante 3 meses, con entramado ligero y sistemas de ATS (Barras de acero tensadas al interior de la estructura, lo que permite incrementar la resistencia sísmica). La Torre cuenta con una fundación de hormigón de 1 metro y medio, y un recubrimiento hermético para evitar el contacto de la madera con el subsuelo. Los muros están desarrollados con tecnología de muros ventilados, los cuales tienen la función de regular la

temperatura y optimizar la eficiencia energética. El montaje definitivo de los módulos, solo necesito un total de una semana para estar listo [26].

La Torre Experimental Peñuelas, es una torre ícono de sustentabilidad en construcción, donde a través de su sistema constructivo se pretende dar respuesta a los mayores problemas de producción de CO₂ en la construcción y a la eficiencia energética de las viviendas.

Edificio Icónico de Rancagua (2020)

Rancagua, Región Libertador Bernardo O'Higgins

CIM UC-Corma y MINVU

Sistema Constructivo: Entramado Ligerio + Placas Estructurales

Edificios de vivienda social eco sustentables, proyectados para construcción próxima, con base de investigación de Torre Peñuelas.

El Edificio se conforma de dos torres de viviendas sociales, las cuales se configuran de 5 y 6 Niveles, con un total de 8.798 m² totales construidos. Esto permite construir un total de 110 viviendas con 3 tipologías de diseño, desde su base con departamentos de 64,1 m² en el primer nivel para personas con movilidad reducida, y en el 5to y 6to nivel con departamentos dúplex que van desde los 56 a los 65 m². Además, cuenta con una proyección de espacio común y áreas verdes en un terreno total de 5.263 m². Esto no solo pretende reintegrar una nueva comunidad, sino que, se pretende sea un punto de interés para toda la región [27].



Ilustración 74. Render Edificio Icónico de Rancagua. Madera 21.

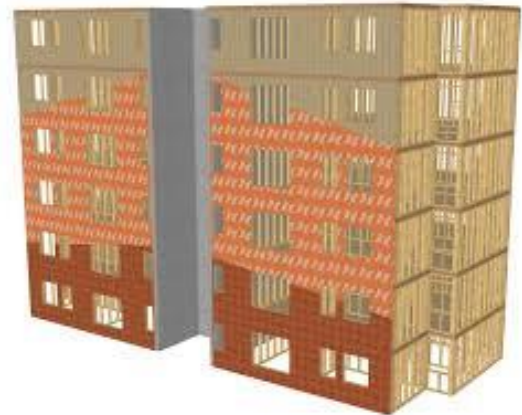


Ilustración 75. Detalle Sistema Constructivo Edificio Icónico de Rancagua. CIM-UC.

Su sistema constructivo de basa en módulos de Marco-Plataforma, los cuales están conformados por un entramado ligero y placas estructurales, incorporando además el sistema ATS comprobado en la Torre Experimental Peñuelas. Este sistema constructivo será utilizado tanto para muros como para entre pisos, configurando así una estructura completamente en madera. Por otra parte, también se utilizará el sistema de muros ventilados propuestos para Torre Peñuelas, para cumplir con las mismas condiciones sustentables y eficiencia energética [1].



Ilustración 76. Fotografía proceso constructivo de proyecto 2017. Madera 21.



Ilustración 78. Imagen actual Edificio piloto Chañaral. CIM-UC.



Ilustración 77. Imagen actual Edificio Piloto en Salado. Madera 21.



Ilustración 79. Corte Perspectivado programático. CIM-UC.

Barrio Oasis de Chañaral y el Salado (2017)

Chañaral y el Salado, III Región.

CIM UC-Corma, MINVU y Corfo

Sistema Constructivo: Entramado Ligero + Placas Estructurales

Los Edificios se conforman en dos emplazamientos diferentes, por el motivo de responder a la emergencia del aluvión del 2015. En estos emplazamientos, se configuran edificaciones contiguas de 2 y 3 niveles, con una configuración individual por departamento por sobre los 50 m². Se construyó un total de 352 viviendas, donde 260 se encuentran en Chañaral y 92 en Salado [28].

Las viviendas fueron adquiridas a través del subsidio D.S.49, Fondo Solidario de Elección de Vivienda, convirtiéndose así, en las primeras viviendas sociales eco sustentables. Esto, debido a que parte de su diseño se configura a través de Paneles Fotovoltaicos para la producción de electricidad, y Sistemas Solares Térmicos para la producción del agua caliente sanitaria, disminuyendo un 85% de gasto en gas y un 40% en electricidad [28].

En su estructura se utilizaron 1700 m³ de madera ingenieril (laminada) de pino radiata, lo que conlleva a 120.000 piezas de madera impregnadas con cobre micronizado para el control de las termitas y condiciones climáticas. El sistema constructivo

utilizado es el mismo que ha implementado CIM-UC en los proyectos mencionados anteriormente, de marco-plataforma + ATS y fachas ventiladas para una mejora en la eficiencia energética [29].

En relación a los precedentes investigados, es que se confirma las tipologías constructivas en madera que se procederán a utilizar en el siguiente capítulo, de acuerdo a los requerimientos propios y del proyecto a explicar. De tal manera que se estudiarán con mayor profundidad, incorporando innovaciones actuales de acuerdo a material o sistema constructivo, para la correcta aplicación en edificaciones de mediana altura en madera.

En resumen, según la información recabada, se puede determinar que para un sistema de entramado pesado de pilar viga se requiere de grandes escuadrías cuando se trata de edificación de mediana altura, y aún más cuando se trata de carpintería de armar o ensambles carpinteros [19] [21] [22]. Esto se debe, a que al fabricar una unión carpintera, se recorta una sección del elemento de madera, por lo que al utilizar grandes escuadrías no pierde su capacidad estructural. Además, se establece que las uniones del sistema constructivo de pilar-viga suelen ser estructuras elásticas para resistir daños causados por los terremotos, lo cual es fundamental en el proceso de diseño de esta investigación, y que favorece a un sistema constructivo con uniones carpinteras [23] [24].

En segundo lugar, queda establecido, mayormente según los precedentes de Valparaíso, que los sistemas de entramados de madera, gracias a la libertad de diseño, permiten adecuar las edificaciones, principalmente ortogonales a cualquier emplazamiento [12] [28]. La libertad de diseño también se establece en la libertad de modificaciones interiores de diafragma, determinando en variados casos estudiados, que las cerchas son las encargadas principales de manejar las fuerzas globales (horizontales y verticales), de tal manera de brindar la rigidez necesaria solo con la estructura primaria [20] [21] [22] [23]. Por otra parte, tal como lo indican [19] [21] [22][22], es que se determina que la manera más eficiente de construir la estructura secundaria, es de manera separada a la primaria, ya que, al apoyar la estructura secundaria en la primaria, es uno de los motivos de perder estructuración y añadir peso extra lo que produce fallas posteriormente.

Finalmente, uno de los temas de mayor relevancia es el uso de la madera en edificaciones, para la producción de menor huella de carbono y crear edificaciones sustentables [22] [24] [27] [28]. Es por esto que uno de los precedentes que lo demuestran es la Torre Experimental Peñuelas, la cual, a través de su sistema constructivo, pretende dar respuesta a los mayores problemas de producción de CO2 en la construcción y a la eficiencia energética de las viviendas. En consecuencia, uno de los factores que ayudan a esto es la prefabricación y la modulación de las estructuras, donde se establece que el diseño pre-fabricado y modular mejora los tiempos y costos de construcción, sin sacrificar el diseño y la calidad espacial y térmica [18] [19] [21] [22][22] [24] [25][25] [28] .

En base a éste marco teórico correspondiente a los capítulos 1-3, se explica a continuación el campo de aplicación de la investigación realizada, en la cual se implementará el diseño estructural de un edificio habitacional de 5 niveles construido en madera.

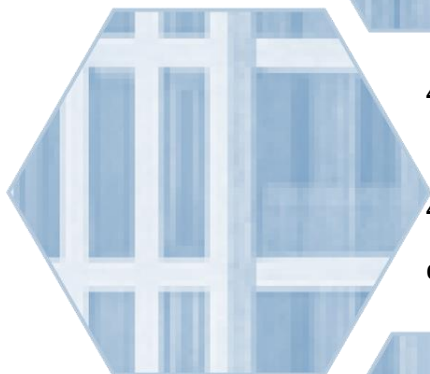




SEGUNDA PARTE

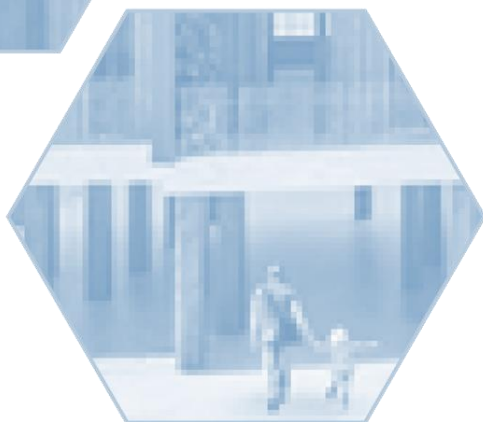


SOLAR DECATHLON: TEAM CHILE / CASA METAMORFOSIS



4.1 Team Metamorfosis: Presentación del Proyecto

4.2 Team Metamorfosis: Estructura y construcción del proyecto



Capítulo 4

4. Solar Decathlon: Team Chile/Casa Metamorfosis

El presente proyecto se origina en el contexto de la participación de nuestra universidad en la competencia internacional Solar Decathlon a llevarse a cabo en esta versión desde 2019 hasta agosto de 2020, en la ciudad de Washington, Estados Unidos. Esta competencia organizada por el Departamento de Energía de EEUU (DOE), tiene como objetivo fundamental desafiar a distintos equipos interdisciplinarios, correspondientes a las áreas de arquitectura, ingeniería y construcción, a **Diseñar, construir y operar edificios innovadores**.

Estos edificios deben cumplir algunos objetivos primordiales como son, utilizar lo máximo posible la energía solar, tener altos grados de eficiencia y que sean impulsados por energías renovables no convencionales (ERNC). Es así, como la competencia consta de 10 pruebas bases de evaluación, lo que también determina su nombre de Decathlon, las cuales se definen como: [30]

1. Rendimiento Energético (*Energy Performance*): Corresponde a la evaluación del uso y la producción de energía del edificio, así como su capacidad para proporcionar servicios de energía, ya sea conectado a la red eléctrica u operando con energía almacenada y en el sitio. El rendimiento energético superior está en el corazón del Decatlón Solar. El modelado energético puede ayudar a informar las opciones de diseño, así como a estimar el rendimiento energético probable de un edificio. El rendimiento energético se verifica midiendo las cargas de los edificios y la generación en el sitio. Las capacidades del edificio para interactuar con la red, y potencialmente abordar las necesidades de una compañía eléctrica local, también forman parte de su rendimiento energético general. Finalmente, la selección cuidadosa y el funcionamiento de la iluminación, las cargas de enchufes, los aparatos y otros componentes son cada vez más importantes, ya que comúnmente representan más del 50% del consumo total de energía en edificios de alto rendimiento.

-
2. **Ingeniería (*Engineering*):** Este ítem consiste en evaluar la integración efectiva de sistemas de ingeniería de alto rendimiento en edificios energéticamente eficientes y productores de energía. Los sistemas estructurales y de ingeniería deben integrarse de manera efectiva con las oportunidades naturales de calefacción y refrigeración, incluida la orientación solar, el almacenamiento de masa térmica, la protección solar y la ventilación cruzada por convección. Los tipos y diseños de sistemas de calefacción, refrigeración, agua y ventilación deben reflejar una consideración cuidadosa de las diferentes tecnologías y opciones de integración, incluido el análisis de las implicaciones para el rendimiento energético y ambiental, los costos iniciales y de largo plazo y la confiabilidad. El sistema de acondicionamiento de espacios debe estar diseñado para mantener la comodidad con condiciones de carga extremadamente bajas a través del control efectivo de la temperatura, el control de la humedad, la mezcla de aire y los sistemas de distribución. Las oportunidades para la eficiencia del agua se deben reflejar en soluciones de ingeniería inteligentes para la distribución de agua caliente doméstica y el riego de jardines, así como la selección de accesorios de plomería y paisajismo.
3. **Factibilidad Financiera y Asequibilidad (*Financial Feasibility & Affordability*):** Este ítem evalúa los costos financieros del edificio y la capacidad para abordar los crecientes desafíos de la asequibilidad en la industria de la vivienda. El propósito de este Concurso es garantizar que la solución única del equipo sea asequible y beneficioso para los ocupantes. El análisis financiero debe incluir el costo inicial para el consumidor, los servicios públicos mensuales y el mantenimiento para determinar el costo general de propiedad y proporcionar una base para la comparación con las capacidades financieras del mercado objetivo. El costo de la construcción, y la medida en que el diseño costaría más que un edificio que cumpla con el código mínimo, debe considerarse y justificarse cuidadosamente.
4. **Resiliencia (*Resilience*):** Uno de los puntos más importantes es evaluar la capacidad del edificio para resistir y recuperarse de los riesgos de desastre prevaletentes para su ubicación prevista, mantener las operaciones críticas durante las interrupciones de la red que ocurren comúnmente después de los desastres y garantizar la durabilidad a largo plazo en respuesta a las condiciones climáticas locales. La resiliencia es la capacidad de anticipar, resistir,

responder y recuperarse de las interrupciones. Los beneficios de invertir en edificios altamente eficientes están protegidos al invertir también en un diseño resistente. Los edificios deben demostrar cómo abordan de manera efectiva todos estos desafíos.

5. **Arquitectura (*Architecture*):** Este ítem evalúa el diseño arquitectónico del edificio, la integración general de los sistemas y la capacidad de ofrecer una estética y funcionalidad sobresalientes junto con un rendimiento energético eficiente. El rendimiento de los edificios energéticamente eficientes y de vanguardia está mejor posicionado para lograr la aceptación del mercado si se integra en diseños arquitectónicos que cumplan o superen de manera creativa las expectativas estéticas y funcionales de la industria y los consumidores. Específicamente, el buen diseño combina la estética con una sólida ciencia de la construcción, eficiencia energética, confort natural (por ejemplo, vistas sin deslumbramiento, calefacción natural, aire fresco natural e iluminación natural), producción de energía y resiliencia.
6. **Operaciones (*Operations*):** Este ítem evalúa la eficiencia del funcionamiento del edificio para llevar a cabo las funciones previstas al tiempo que garantiza la persistencia del rendimiento. Los sistemas de construcción, los dispositivos y las características deben seleccionarse cuidadosamente e integrarse en el diseño general. Los edificios deben incorporar soluciones creativas y técnicas que funcionen a la perfección con la eficiencia energética y las estrategias de producción de energía. Esto incluye estrategias para la persistencia del rendimiento (por ejemplo, eficiencia, comodidad, salud, seguridad y durabilidad) que abordan las limitaciones de operación de los ocupantes típicos.
7. **Potencial de Mercado (*Market Potential*):** Este ítem evalúa la capacidad de respuesta del edificio a su mercado objetivo declarado, su atractivo para los ocupantes previstos y la industria de la construcción, y la capacidad de transformar la forma en que se utiliza la energía en los edificios, dado su enfoque y su deseabilidad a gran escala. Para garantizar la aceptación en el mercado e impulsar la demanda y la oferta, los diseños efectivos de eficiencia energética tienen en cuenta los intereses de los ocupantes y propietarios de los edificios, así como la industria de la construcción. En el lado del consumidor, los diseños deben reflejar cómo los ocupantes pueden usar y disfrutar

mejor el entorno construido y adaptarse a las preferencias cambiantes de los ocupantes a lo largo del tiempo. Por el lado de la oferta, un diseño exitoso considerará cómo reducir el tiempo del ciclo de construcción, garantizar una calidad excepcional y mejorar la productividad de la construcción. También incluirá documentación de construcción que ayuda a garantizar las mejores prácticas y la mano de obra de calidad.

- 8. Confort y calidad ambiental (*Comfort & Environmental Quality*):** Este ítem evalúa la capacidad del edificio para integrar el confort y la calidad ambiental en el interior con un rendimiento eficiente de la energía. Los edificios bien diseñados proporcionan un ambiente interior cómodo y saludable. Para que los ocupantes se sientan cómodos, el edificio debe poder controlar los niveles de temperatura y humedad relativa, así como reducir las perturbaciones de las fuentes de ruido interiores y exteriores. Para proporcionar un ambiente interior saludable, el diseño debe incluir un enfoque integral de la calidad del aire interior que incorpore estrategias de ventilación, filtración, dilución y selección de materiales.
- 9. Innovación (*Innovation*):** Este ítem evalúa el éxito del diseño incorporando innovaciones y / o enfoques creativos que mejoran la eficiencia energética, la producción de energía, la interacción de la red y las operaciones de construcción, así como la funcionalidad y el atractivo general. Los diseños efectivos incorporan innovaciones que pueden ser aceptadas por la industria de la construcción y los consumidores a gran escala. Se alienta a los equipos a encontrar soluciones que utilicen tecnologías nuevas o existentes, así como otras medidas creativas para mejorar las operaciones de construcción y la conveniencia.
- 10. Presentación (*Presentation*):** Este último ítem evalúa la capacidad del equipo para transmitir con precisión y eficacia su estrategia de diseño y rendimiento energético a las audiencias relevantes. La propuesta de valor de la eficiencia energética y las oportunidades de energía renovable deben transmitirse claramente a los líderes de la industria y al público en general. Un diseño inteligente en sí mismo es insuficiente. La calidad de la presentación puede afectar dramáticamente la percepción del mercado y la probabilidad de adopción de innovación.

De este modo, después de una selección mundial de equipos, es como quedan clasificados 11 finalistas, entre los cuales se encuentran los países de EEUU representado por 7 equipos de universidades reconocidas, Canadá con la Universidad de Waterloo, Holanda con la Hogeschool Utrecht University of Applied Sciences, Sudáfrica con la University of the Witwatersrand, y el único país de América latina Chile, representado por el Team Metamorfosis de la Universidad Técnica Federico Santa María [31].

4.1 Team Metamorfosis: Presentación del Proyecto

El Team Metamorfosis consta de un grupo multidisciplinario de la Universidad Federico Santa María, el cual es liderado por estudiantes y docentes del departamento de arquitectura, y con integrantes de los distintos departamentos de la universidad, como es el de ingeniería mecánica, ingeniería civil, ingeniería electrónica e ingeniería industrial.



Ilustración 80. Team Metamorfosis Solar Decathlon 2020. Arquitectura USM.

En el marco de los requerimientos del concurso, es que se propone el diseño de un edificio de mediana altura, de madera con fundación de hormigón. El edificio se diseña con un objetivo de uso mixto, donde el principal desarrollo se basa en las viviendas y programas de uso público y privado, como son jardines infantiles, sectores deportivos y de comercio.

El origen del proyecto surge de la necesidad de viviendas de calidad y a precios accesibles en la comuna de Ñuñoa en la Región Metropolitana, donde existe actualmente una problemática de gentrificación y segregación por parte de los actuales residentes de las edificaciones aledañas y las nuevas familias que buscan un hogar. Es así, como queda al descubierto la poca accesibilidad de nuevas viviendas para familias de sectores medios. Ya que si bien las edificaciones existentes correspondientes a la construcción de la Corporación de la vivienda (CORVI) de 1950-1970 que configura edificios de hormigón de 4 niveles son propiedad de personas de sector económico medio, ya pasaron a ser viviendas de mayor valor o plusvalía. Esto, provoca que la comuna y las nuevas construcciones aumenten su costo, posicionando las nuevas viviendas en destino de un estatus económico mayor, lo que impide acceder a los familiares de los residentes actuales a quedarse en la misma comuna con sus nuevas familias.

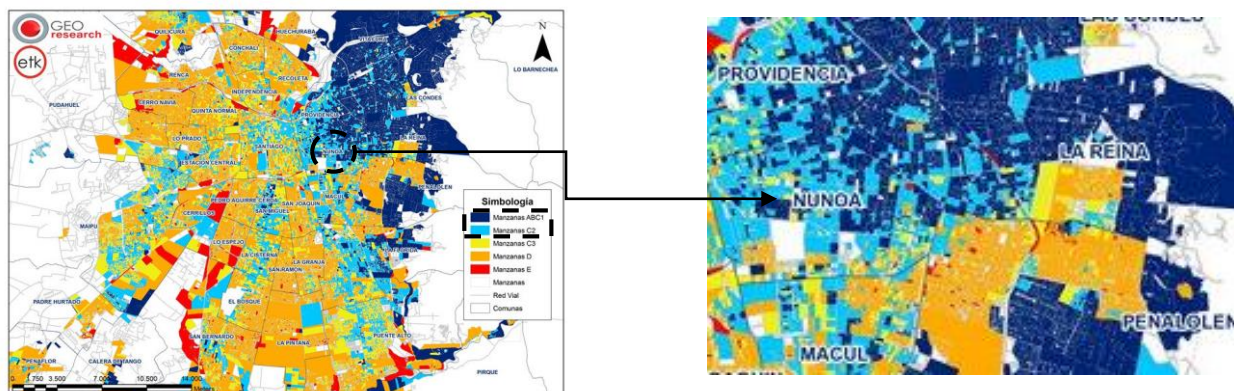


Ilustración 81. Grupos Socioeconómicos para 2017 en Santiago de Chile: ABC1 (incluye el AB y C1a), C2, C3, D, E; Fuente: Georesearch.

En base a una toma⁵ existente en una cancha de fútbol estatal, que no tenía un uso regular, el comité de vivienda del vecindario encabeza el establecimiento de las familias con viviendas provisorias en el terreno, sin un permiso regulado y como alegato a su problemática de no poder acceder a una vivienda en su barrio de toda la vida. Asimismo, es que el equipo metamorfosis plantea la ubicación del proyecto en la cancha tomada por los vecinos, de tal manera de

⁵ Toma: acción de ocupar y habitar ilegalmente un **terreno**. Es "la posesión de un **terreno** sin ventas ni títulos", construyendo sobre él una casa, un rancho o una mediagua. (Biblioteca del Congreso Nacional)

responder a los mismos usuarios su problemática de vivienda, considerando además un masterplan que incluya y unifique esta nueva comunidad con todo el entorno cercano, ya sea público o privado.

El edificio planteado por el Team Metamorfosis, conserva los lineamientos estéticos del barrio, conservando la altura promedio de las edificaciones del sector y basándose en el diseño de otras comunidades como son la Villa Frei en Santiago y la población Márquez en Valparaíso. El proyecto a través de su diseño conservando el carácter público de la cancha y trabajando para los mismos vecinos *“plantea ser un hito dentro del barrio, que mejore la calidad de vida y diversifique las actividades que los vecinos puedan desarrollar en el barrio, un lugar de reunión, de organización y de acopio en caso de desastre...”* [3].

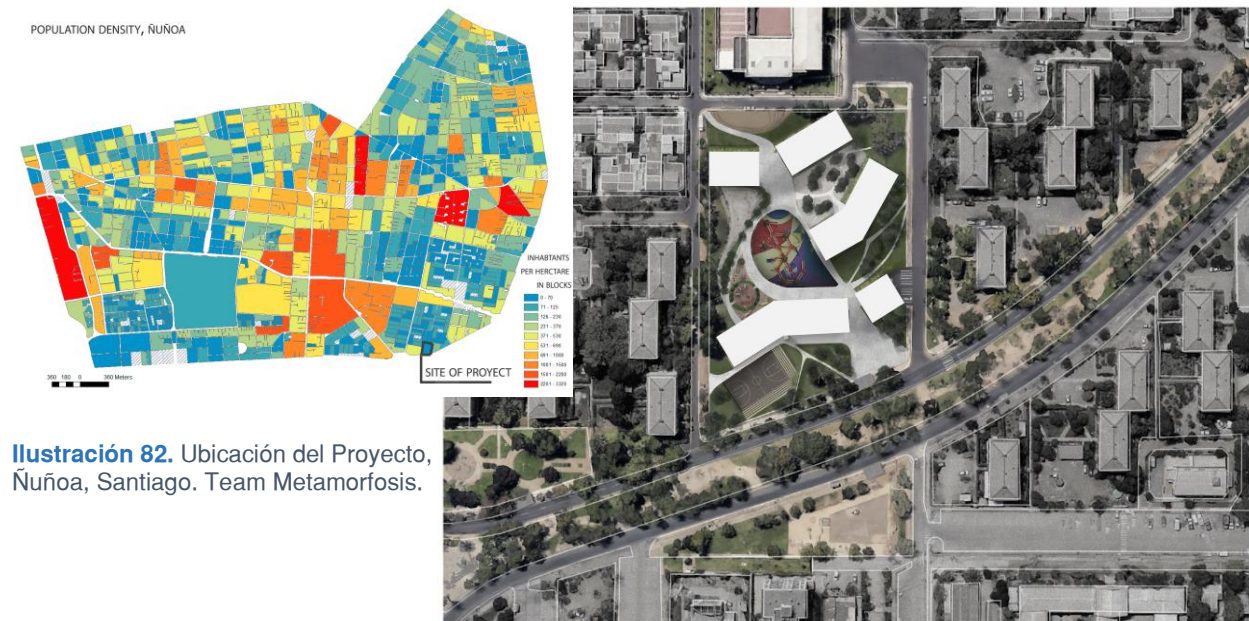


Ilustración 82. Ubicación del Proyecto, Ñuñoa, Santiago. Team Metamorfosis.

En el masterplan considerado en el sitio, se establece la ubicación de algunos programas fundamentales en el diseño, como son el jardín infantil, patios interiores vinculantes con el entorno, un skatepark, patio de juegos entre otros. Por

otra parte, también se consideran algunas viviendas especiales para personas con movilidad reducida, o viviendas transformables, las cuales se explicarán con mayor detalle a continuación.

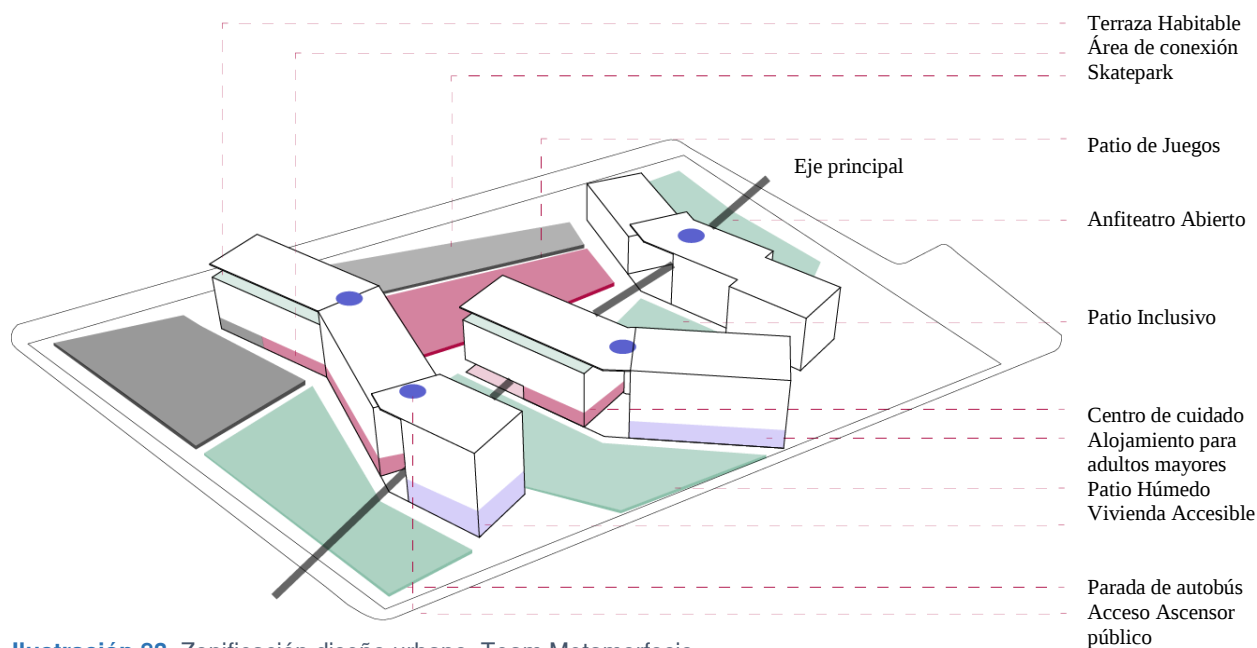


Ilustración 83. Zonificación diseño urbano. Team Metamorfosis

Por otra parte, los accesos se establecen como accesos públicos o comunes, de tal manera que se ubican en los quiebres de los bloques de vivienda. Estos ascensores están inspirados en los ascensores de Valparaíso, con la voluntad de generar un modelo de utilidad que permite que sean sostenibles en el tiempo sin comprometer el precio final de la vivienda ni significar un elevado gasto común para los residentes.

El proyecto Metamorfosis es un edificio multifamiliar de ingresos y usos mixtos, el cual establece un diseño sustentable en tres ámbitos; social, ambiental y económico. La palabra Metamorfosis según la RAE significa “Transformación de algo en otra cosa. [32]”. Lo cual se transforma en la base de diseño del edificio, planteándose

como desafío principal la adaptación del espacio habitable con el paso del tiempo, convirtiéndose según la necesidad a los cambios temporales de las familias. El conjunto de edificios Metamorfosis consta de 7 bloques de entre 5 y 6 niveles de altura, los que completan un total de 96 unidades habitables entre los 32 y los 117 m². La característica

principal del diseño del edificio, es la capacidad de adaptarse a los cambios familiares mencionados anteriormente, lo cual se traduce en un diseño habitacional con la capacidad de cambiar físicamente los espacios, ya sea para aumentarlo o disminuirlo. Para realizar esta configuración de metamorfosis, se establecen 3 tipologías de departamentos, entre los cuales están los que se pueden modificar tanto horizontalmente como verticalmente volviéndose dúplex.

Para los departamentos que se pueden modificar, se establece una zona de cambio denominada el espacio “k”, los que son espacios flexibles que permiten operaciones dentro de una unidad y entre dos o más viviendas adyacentes, en el mismo piso o entre dos pisos, pudiendo transformar el espacio y el área de la casa.

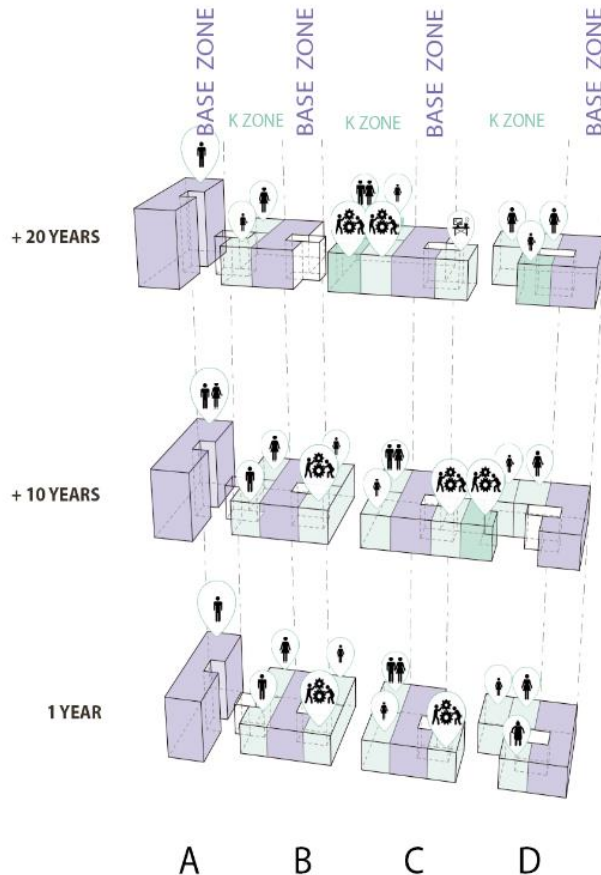


Ilustración 84. Proyección de transformación de familias en 20 años. Team Metamorfosis.

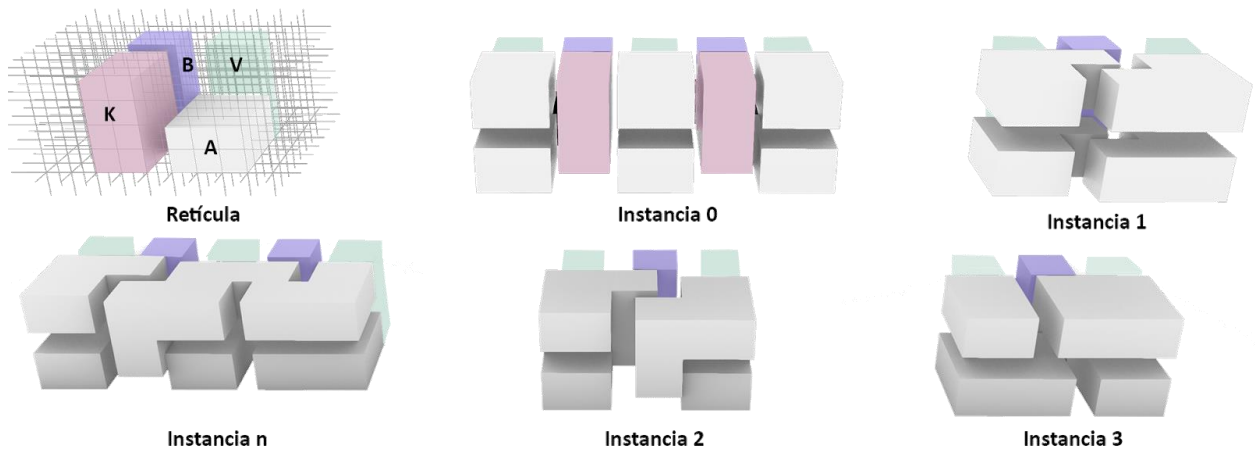


Ilustración 86. Posibles transformaciones en 20 años. Team Metamorfosis.



Ilustración 85. Render edificio proyectado. Team Metamorfosis.

4.2 Team Metamorfosis: Estructura y construcción del Proyecto

El proyecto se establece como una edificación de mediana altura construida en mayor porcentaje en madera, donde su fundación y primer nivel corresponde a una estructura de hormigón armado, el cual no solo funcionará como fundación del edificio, sino que también será el objetivo público del diseño general. Para la separación de ambos sistemas constructivos, se utilizarán aisladores sísmicos que permitirán un mejor funcionamiento sísmico en el general de la estructura, permitiendo que ambas cumplan con los requerimientos normativos de manera individual y en conjunto.

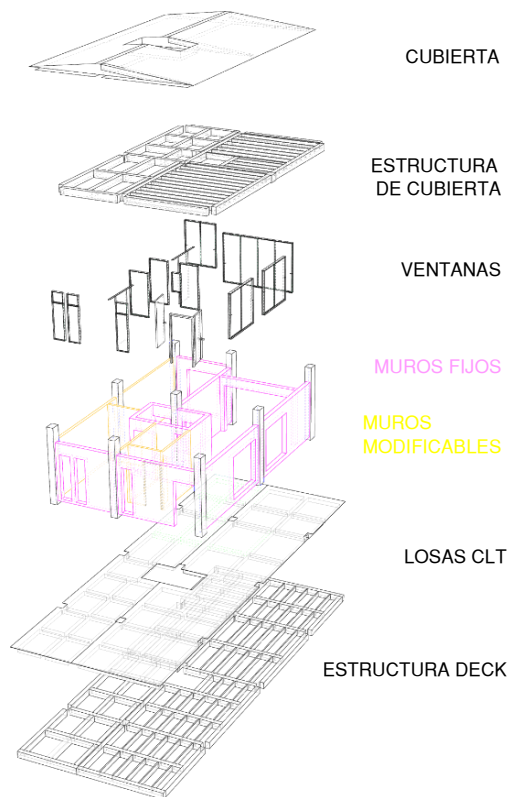


Ilustración 87. Axonométrica Edificio. Team Metamorfosis.

El sistema constructivo en madera del proyecto se establece en 3 estructuras verticales, Primaria, secundaria y terciaria. Estas a su vez se verán complementadas con los suelos, cielos y techumbres que funcionarán soportando cargas horizontales. La estructura primaria consiste en un sistema constructivo de Pilar-Viga, las cuales se configurarán de piezas de madera laminadas y serán complementadas con las distintas tipologías de muros que se explicarán posteriormente. Asimismo, en la estructura primaria también se identifican las losas de CLT que por su parte permitirán las transformaciones verticales del edificio, y que serán las bases de unión de la estructura en general.

Para lograr la transformación de la espacialidad del edificio, es que se establece determinar 3 tipologías de muros, los cuales además de cumplir distintas funciones en la estructura general del edificio, brindarán las posibilidades de transformación y rigidez de los sectores mencionados anteriormente. Es así, como existen muros fijos (secciones rígidas), muros transformables que se pueden modificar, pero no retirar (se modificarán los vanos diseñados) y los muros removibles que no recibirán cargas directas del edificio.

En la ilustración 88 se muestra la planta de uno de los pisos superiores de un bloque del conjunto. Cada piso posee cuatro zonas base que son la unidad mínima sin ampliaciones, contiguas a dichas zonas se encuentran los espacios k, que reciben las transformaciones entre las zonas base, de tal forma que independiente de la organización todos los departamentos siempre tendrán ventilación cruzada y fachada norte (orientación adecuada en la zona central de Chile). Longitudinalmente el bloque es atravesado por un área fija que contiene las zonas húmedas asociadas a patios de luz que permiten la iluminación de los espacios centrales de los departamentos y ventilación. Dicha área intersecta tanto a zonas base, en torno a las cuales se ubican baño y cocina, como a zonas k, donde se pueden ampliar o crear nuevos recintos que requieran instalaciones de agua. Dentro de cada bloque, los departamentos del extremo exterior son dúplex capaces de variar su configuración en la vertical, pero elementos restrictivos en la horizontal [3].

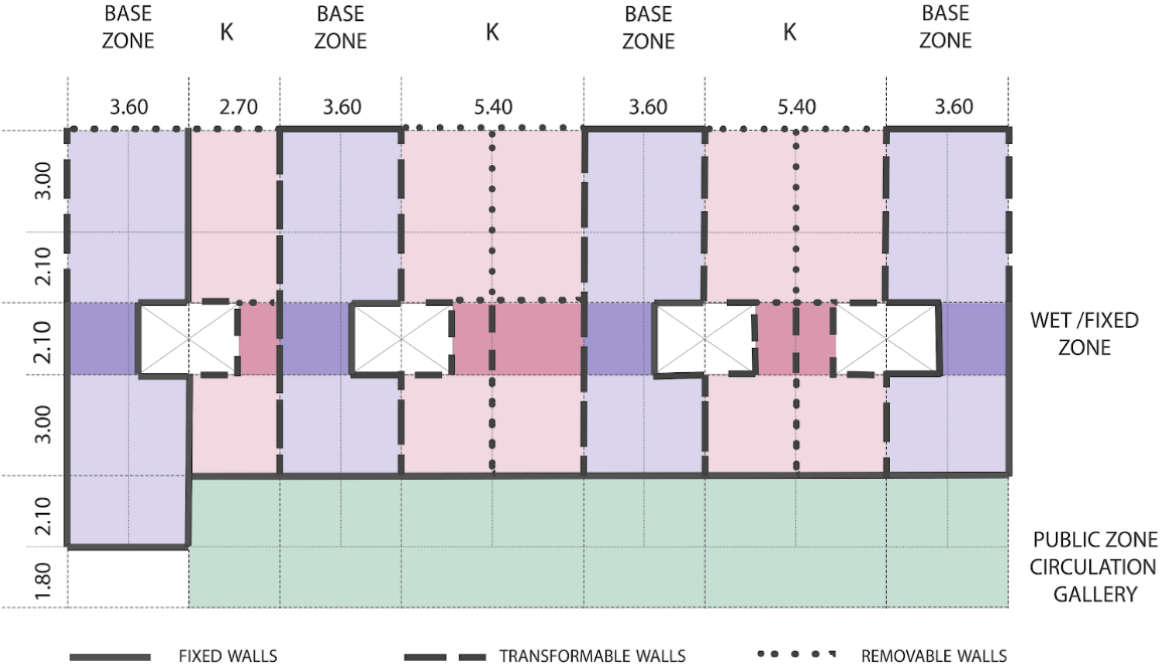


Ilustración 88. Zonificación de una Planta Tipo de un edificio donde se muestran los tipos de restricciones que dan los muros. Team Metamorfosis.

Las transformaciones en los espacios mostrados en la ilustración 88 se dan gracias a las características de los muros que rodean cada zona mostrados en la figura y mencionados anteriormente. Cabe destacar que el diseño general de la estructura del edificio continúa en proceso de desarrollo, por lo cual las planimetrías tipo y oficiales aún no son las definitivas. Así también, se definirán tipologías de muros y vanos para zonas húmedas y zonas secas, de tal manera de crear un catálogo de muros definidos para modificación, planteando una base de diseño y modificación que los mismos usuarios podrán utilizar.

Para el concurso de Solar Decathlon 2020, se está trabajando paralelamente en tres ejes de diseño; Prototipo a construir en Chile, Prototipo a trasladar a EEUU y Edificio completo. Esto en base a los requerimientos propios del concurso y a requerimientos que se tendrán que cubrir desde el país, como son las mediciones climáticas, entre otros. En cuanto a su estructura, se plantea de manera individual para cada objetivo, ya que dependerá también de los materiales proporcionados por los auspiciadores, y al peso que se debe ahorrar para el traslado y/o construcción in situ.

Los prototipos mencionados, corresponden a una sección del edificio completo, donde el prototipo de Chile corresponde a un departamento completo con ampliación (utilización zona k), el cual será construido (piezas de madera) en la Universidad del Bio Bio en la región del Biobío y trasladado posteriormente para ser ensamblado y terminado en el campus USM de San Joaquín en Santiago. Este consiste en un prototipo de madera de 65.52 m², el cual se configura con 2 dormitorios, un baño, cocina, living y terraza.

Este prototipo de Chile, será la base de las mediciones que constaría de la zona base, con sus instalaciones sanitarias y eléctricas correspondientes y el espacio K anexo que sería un muestrario de la estructura del edificio y de las posibles transformaciones dentro de la vivienda.



Ilustración 90. Render Prototipo a construir en Chile. Team Metamorfosis.

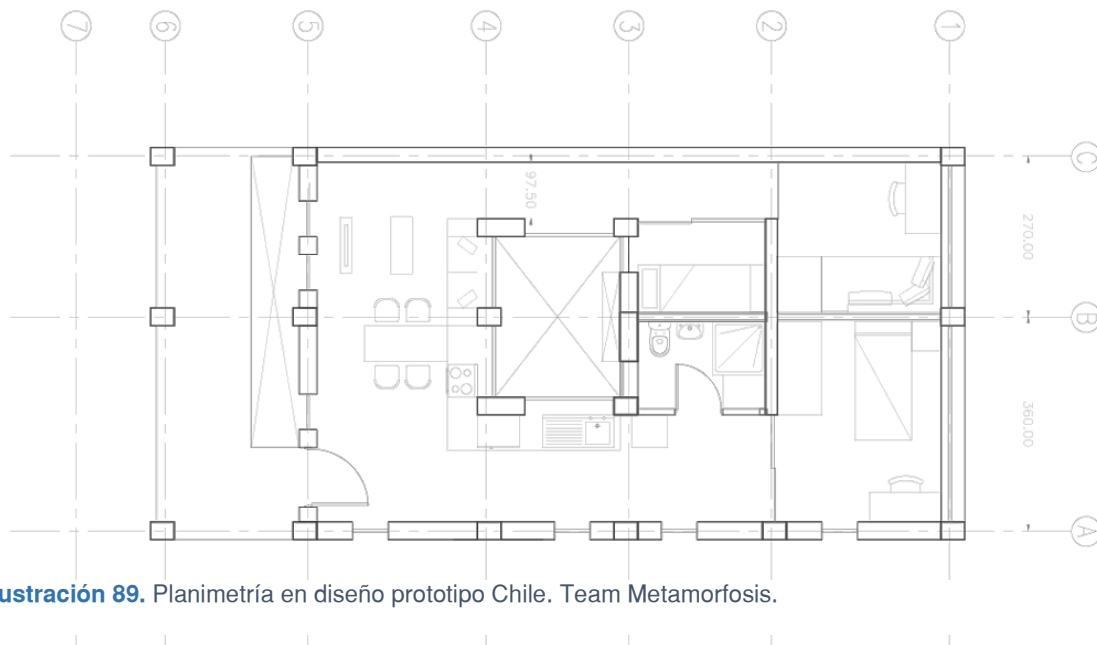


Ilustración 89. Planimetría en diseño prototipo Chile. Team Metamorfosis.

En cuanto al prototipo que se llevará al festival en Washington D.C, será el mismo departamento considerado en el prototipo de Chile, pero sin la ampliación del espacio K. Este prototipo considera 36 m2 construidos y se configura como un loft, con 1 dormitorio, un baño, cocina americana, living y terraza. En este prototipo se desarrollarán todas las pruebas propias del concurso, es decir las 10 competencias a evaluar en el festival de exposición de 2020. Es por esto que, para una mejor comprensión del diseño y la arquitectura del departamento original, es que se implementarán sistemas tecnológicos de realidad aumentada y se designará un sector de exhibición de los muros transformables.

Por otra parte, este prototipo tiene algunas características propias del concurso, las cuales considera un tráiler en el cual será exhibido, dimensiones limitantes correspondientes al tráiler y al envío de Chile a EEUU, y el peso a considerar para el menor cargo de envío y traslado.



Ilustración 91. Render Prototipo a construir en EEUU para Solar Decathlon. Team Metamorfosis.

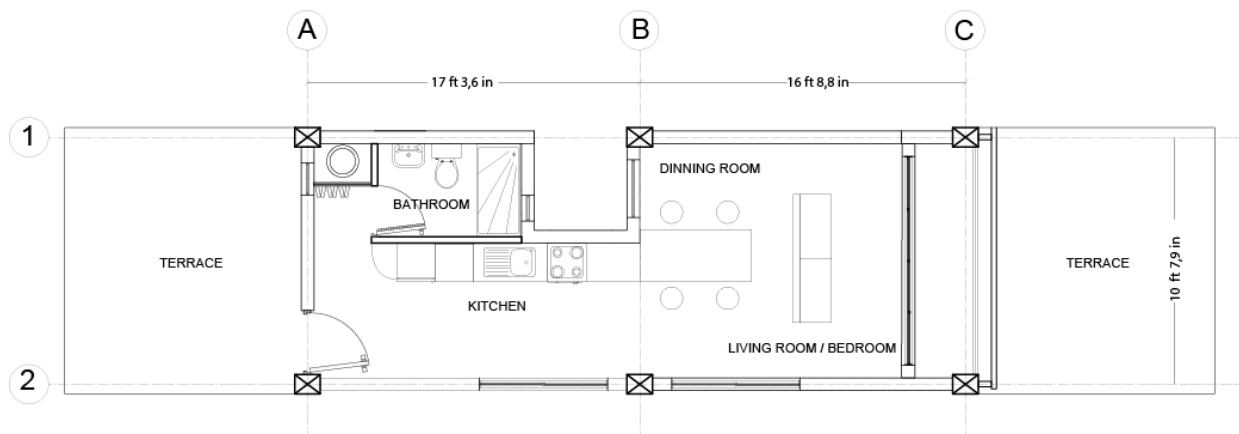


Ilustración 92. Planimetría propuesta prototipo SD 2020. Team Metamorfosis.

En el concurso Solar Decathlon 2020, las 10 competencias definidas son de igual importancia, es por esto que se pretende abarcar todas las áreas posibles, respondiendo con la mayor eficacia todas las problemáticas. Uno de estos puntos importantes es la innovación y la eficiencia energética, por lo que se plantea brindar un enfoque de unión entre ambos puntos, considerando un sistema constructivo innovador que aumente o favorezca la eficiencia energética de la vivienda, sin necesidad de un mayor uso de materiales o tecnologías.

Asimismo, en el diseño final del edificio se implementarán soluciones constructivas de acuerdo a la normativa y requerimientos propios de la edificación, que se presentarán en el próximo capítulo, brindando también la solución constructiva final a todas las estructuras que se plantean.

5

SOLUCIÓN ESTRUCTURAL: SISTEMA CONSTRUCTIVO MIXTO EN MADERA

5.1 Metodología de Diseño

5.2 Matriz de Requerimientos

Capítulo 5

5. Solución Estructural: Sistema constructivo mixto en madera.

El Edificio Metamorfosis está diseñado como un conjunto habitacional de 5 niveles de altura, dentro de los cuales se encuentra el primer nivel de hormigón armado y desde el segundo al quinto nivel en madera ingenieril. El primer nivel cuenta con un diseño de fundación de zapata aislada y un sistema constructivo de marco rígido con columnas circulares, donde la zapata queda como fundación profunda por debajo de la losa de fundación y sube hasta la unión continua con la viga. Este primer nivel tiene como objetivo principal, albergar los programas de uso público o privados comunitarios, por lo que será un punto focal del diseño general del conjunto. Es por esto, que la diferencia de materialidad no solo se utilizará como base fundacional, sino que también como estrategia de diseño, utilizando el hormigón por sus características constructivas moldeables, de tal manera de establecer un diseño particular de fachada. Por otra parte, el uso de hormigón en el primer nivel favorece a la aislación de humedad del suelo con la estructura de madera, de tal manera que la separa y permite una mayor duración de la estructura.

Cómo se investigó en el capítulo 3, ya existen precedentes constructivos que han implementado el diseño de un primer nivel de hormigón y los niveles superiores con madera ingenieril como es el caso del edificio Mjostarnet, es por esto que se establece como sistema constructivo funcional para edificaciones de mediana altura. El hormigón armado actualmente se ha convertido en el principal material utilizado para la construcción de edificaciones, y por lo mismo, se tiene mayor conocimiento de sus pasos constructivos. Sin embargo, su diseño estructural será revisado y corroborado por un ingeniero civil calificado para el correcto funcionamiento y resistencia de la carga completa del edificio. Por otra parte, debe estar correctamente diseñado para la resistencia de las fuerzas sísmicas, brindando una continuidad con los elementos superiores de madera.

Por ende, se pretende brindar una innovación estructural a través de un sistema constructivo mixto en el ámbito de la construcción en madera en Chile, implementando nuevos materiales y un sistema constructivo con utilización de robótica automatizada para su manufactura y producción.

5.1 Metodología de Diseño

De acuerdo a las preguntas e hipótesis, es que se generan los distintos objetivos de diseño, los cuales se dividen en el objetivo general y objetivos específicos, que determinan la formulación de la matriz de requerimientos. La matriz de requerimientos establece los objetivos principales a evaluar al momento de diseñar o proponer una posible solución, de tal manera que el campo de evaluación crezca y permita más de una solución a un mismo objetivo o requerimiento.

Fomentar en el uso de la madera como material predominante y sustentable para edificaciones de mediana altura, a través del desarrollo de un sistema estructural espacialmente reconfigurable post-construcción, basado en carpintería de armar en madera aserrada e ingenieril, y obtenida desde procesos de manufactura robótica.

(Obj. específico 1) Construir un sistema estructural sustentable, de baja emisión de CO₂, desde la producción del material, manufactura de las piezas, hasta la reutilización de la estructura.



(Obj. específico 2) Construir un sistema estructural para vivienda de mediana altura que permita transformabilidad y adaptabilidad arquitectónica post-construcción, frente a cambios de estilo de vida



(Obj. específico 3) Definir requerimientos mínimos para el cumplimiento de normas sísmicas, resistencia al fuego y prestaciones estructurales del sistema constructivo propuesto.



Finalmente, luego de haber completado los primeros pasos del proceso de diseño explicado en la presentación hasta los objetivos se plantean las acciones, las cuales responderán a los requerimientos de la matriz desarrollada.

5.2 Matriz de Requerimientos

Req ID	Fecha	Nombre del Requerimiento (o sub-Requerimiento)	Descripción del Requerimiento	Tipo de Requerimiento
1	05-04-2019	El edificio propone fomentar en el uso de la madera como material predominante y sustentable para edificaciones de mediana altura	Se buscará la sustentabilidad como eje de diseño para todo el ciclo de vida del edificio, considerando la menor producción de CO2	Sustentable
1.1	06-06-2019	Se utilizará madera certificada ingenieril	Un mínimo del 50% de los productos y materiales nuevos de madera utilizados en el proyecto, debe tener la certificación del Consejo de Manejo Forestal (Forest Stewardship Council, FSM).	Sustentable
1.2	06-06-2019	Se utilizará materiales locales para su construcción	Madera de una zona regional (VOIPIR, Villarrica).	Transporte
1.3	06-06-2019	Se desarrollará una correcta gestión de desechos	Desviar los escombros de construcciones y demoliciones del desecho en vertederos e instalaciones de incineración. Redirigir los recursos reciclables recuperados a los procesos de fabricación y los materiales reutilizables a los sitios adecuados.	Sustentable
2	05-04-2019	El sistema estructural diseñado permitirá transformabilidad y adaptabilidad arquitectónica, frente a cambios de estilo de vida de los usuarios en el tiempo.	Modificaciones posteriores a su construcción por parte del usuario, ya sea para aumentar o disminuir superficies, y para modificaciones arquitectónicas de elementos y vanos.	Estructural
2.1	05-04-2019	Se distribuirá el sistema estructural en 3 área de soporte de carga	Delimitación de 3 tipologías de estructuras en la construcción del edificio	Estructural
3		Definir requerimientos mínimos para el cumplimiento de normas sísmicas, resistencia al fuego y prestaciones estructurales del sistema constructivo propuesto.	Se establecen rangos mínimos y máximos de cumplimiento normativo para construcción de mediana altura en madera.	Estructural
3.1	10-06-2019	El edificio deberá soportar cargas verticales y horizontales.	Se determinan las tensiones admisibles que manejan el comportamiento estructural de edificaciones en madera.	Estructural
3.2	11-06-2019	Responderá al movimiento sísmico sin colapsar la estructura	El movimiento de todos los niveles debe moverse de manera conjunta sin producir un colapso en la estructura o uniones CAR	Estructural
3.3	05-04-2019	El diseño de todas las estructuras deberán responder a los requerimientos normativos mínimos de resistencia al fuego	Definición de resistencia al fuego según tipología estructural, ya sea para muros exteriores e interiores	Estructural

Tabla 2. Matriz de Requerimientos Estructurales e ingenieriles. Elaboración propia.(Revisar tabla completa en Anexo 1)

Para una mejor comprensión de ésta matriz de requerimientos, es que se definirán y explicarán los objetivos o requerimientos más relevantes para el proceso de diseño. De tal manera que a través de un proceso consecutivo se llegue a una solución concreta.

5.2.1 Comenzando por el Requerimiento 1: **El edificio propone fomentar en el uso de la madera como material predominante y sustentable para edificaciones de mediana altura.** Éste requerimiento se refiere principalmente a la disminución de la huella de carbono en todo el proceso constructivo del edificio, desde el material predominante en la construcción, como en todo su proceso de producción o manufactura, hasta la reutilización final de la estructura. Para esto es que se establece un proceso constructivo sustentable, donde se evalúan algunos puntos específicos del proceso general, considerando tanto la fundación de hormigón del primer nivel, como la estructura superior de madera.



Diagrama 3. Ciclo de Vida de la Construcción Sustentable. MINVU.

Pero, ¿por qué escoger madera como material constructivo?, la madera como material noble cumple con varios de los requerimientos planteados para una construcción sustentable, uno de ellos es la baja emisión de CO₂ tanto en su proceso de manufactura o producción, como en la posibilidad de crear sistemas constructivos modulares, prefabricados, que permiten menores tiempos de la construcción o ensamblaje in-situ [33]. Esto conlleva a menores tiempos de construcción y menores costos también de imprevistos en obra. Por otra parte, en el

tiempo de la deconstrucción o tiempo de retiro de escombros, se reduce a la reutilización, de tal manera, que tanto piezas como paneles se pueden reutilizar en otras construcciones de similares características.

Asimismo, es que todas estas características van en directa relación con el uso y gasto de la energía utilizada, tanto en el proceso constructivo como en el uso post-ocupación. Es por esto, que se piensa en una solución constructiva eficiente, que permita el mayor porcentaje de aislación térmica como acústica, para un menor uso de sistemas de calefacción en el uso diario de las viviendas.

Según estudios de la Cámara Chilena de la Construcción (CCHC) en el mundo, la energía consumida corresponde al 40% por inmuebles y un 90% por las viviendas, considerando la última en tres fases de mayor relevancia. Estas tres fases determinan un 19% de consumo de energía en construcción, un 80% consumida en operaciones de construcción de viviendas y finalmente un 1% consumida en demolición.

Actualmente la mayor energía consumida es la de utilización de las viviendas, es decir, en el proceso post-ocupación, principalmente debido a la utilización de electrodomésticos y sistemas de calefacción. Por otra parte, el 40% de la energía consumida corresponde a la construcción de nuevos inmuebles, a lo cual se pretende responder con un sistema constructivo modular, el que será prefabricado y ensamblado in-situ, disminuyendo el 19% de energía utilizada en construcción y el 80% de energía utilizada en operaciones. Finalmente, aunque el consumo de energía en demolición corresponde al 1%, también es un objetivo disminuirlo, ya que se pretende que su deconstrucción sea a través de un proceso de retiro de las piezas y la reutilización de éstas si fuese necesario.

Ahora respondiendo al requerimiento 1.1, donde se establece el uso de madera certificada ingenieril, se determina el uso de 4 tipos de madera:

a) Madera Laminada certificada para estructura primaria:

Madera de Pino Radiata proveniente de bosques sustentables. Seleccionada por su resistencia, apariencia y unida mediante finger joint, formando láminas que luego se encolan por sus caras utilizando un adhesivo estructural para

uso exterior. Componentes Laminados rectos, de sección variable y hasta 30 m de longitud, cepillada por sus 4 caras. Cada pieza tiene una etiqueta que identifica el producto [34].

La madera laminada originalmente era proporcionada por CMPC maderas, las cuales son un producto certificado que cumplen con la norma chilena NCh 2148 de Madera Laminada, Encolada, Estructural – Requisitos e Inspección. Fabricadas con adhesivos MUF (Melamina Urea Fornaldehído) y PUR (Poliuretano) [35]. Se solicitará Pilares y Vigas Laminados de secciones personalizadas, Pilares 40 x 30 cm y Vigas de 30 x 20 cm.



Ilustración 93. Imágenes referenciales de producto CMPC. Edificio Corporativo CMPC, Los Ángeles, Chile.

Por otra parte, los productos cuentan con la certificación de **Certificación Cadena de Custodia FSC®**, lo que se refiere al mecanismo a través del cual una Empresa garantiza al consumidor que la madera utilizada en la fabricación

de sus productos proviene de un bosque o una plantación certificada FSC®, entre otras certificaciones de la empresa [36].

b) Paneles de CLT para losas:

Actualmente en Chile aún no se fabrica el CLT de manera masiva, ya que se encuentra en procesos de investigación y ensayos con madera nacional. Pese a esto, ya existen construcciones con Paneles de CLT fabricados en la Universidad del Bío Bío, los cuales han sido expuestos a ensayos y pruebas que han respondido correctamente [37].

El material consiste en tablones (o laminillas) de madera aserrada y encolada, donde cada capa es orientada perpendicularmente a la capa anterior. Al unir capas de madera en ángulos perpendiculares, la rigidez estructural del panel se obtiene en ambas direcciones, similar a la madera contrachapada, pero con componentes más gruesos. De esta manera, el panel tiene buena resistencia a la tracción y compresión [38]. Para el proyecto se solicitan Paneles de CLT contraplacado de 10 cm de espesor y dimensionamiento personalizado, los cuales solo se considerarán para la construcción de los prototipos.

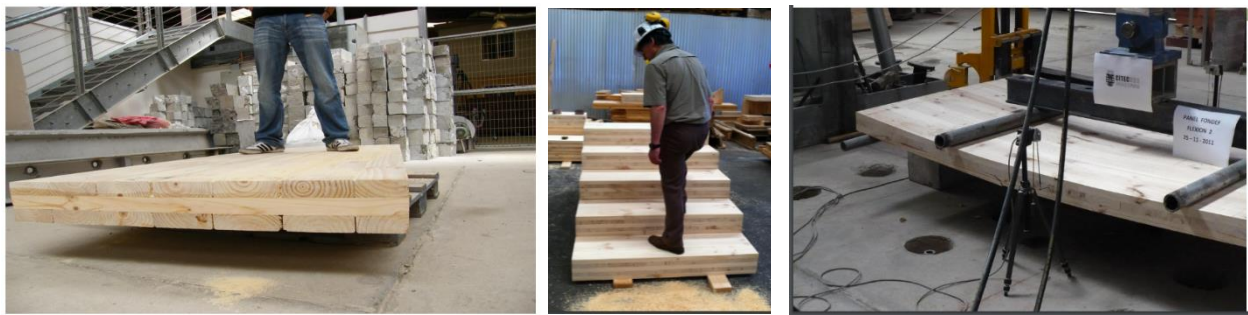


Ilustración 94. Imágenes referenciales de Losas CLT producidas por CMPC en Universidad del Bío Bío. Seminarios Edificios en Madera 2017.

c) Panel pre-fabricado de Terciado estructural para muros fijos:

Como elemento constructivo de innovación, se utilizará un muro diseñado por CMPC, el cual consiste en un paquete estructurado con paneles de terciado estructural y planchas de vulcanita, los cuales tienen como característica

principal, el estar aislado con aislante vegetal y una plancha de revestimiento diseñada por la misma empresa. Este revestimiento es el punto focal del muro, ya que es una aleación con cobre, la cual impide el ataque de termitas en el material en un 99%. Para el proyecto serán solicitados los muros como superficies, estableciendo los muros con dimensiones definidas y en estado de panel pre-fabricado.



Ilustración 95. Muro diseñado por CMPC, el que será utilizado en prototipo Metamorfosis como muro fijo. Fotografía Propia.

d) Madera Aserrada para estructura de muros removible.

El diseño del muro removible como panel, será confeccionado por Tamara Norambuena integrante del Team Chile, por lo que tal diseño será incorporado posteriormente a la estructura primaria. El Panel Removible, consistirá en un panel prefabricado, que consistirá de una estructura auto portante diseñada con madera aserrada y complementada con aislante vegetal y planchas de osb y yeso-cartón.

Para la estructura de este panel se considera madera aserrada no estructural, proporcionada por CMPC. La Madera solicitada será la de madera dimensionada, la cual es Indicada para estructuras de maderas en general que no requieran características estructurales o aplicaciones a la vista. Más liviana y sin agrietamientos, terminación dimensionada sin cepillar, homogénea en dimensión, seca en cámara a un 15%CH1 promedio. Identifica la madera dimensionada con

los cabezales color café y su Sticker Qualimad Dimensionado. Proviene de bosques certificados [39]. Para la construcción del prototipo de considerarán elementos de escuadrías dimensionadas, basadas en la tabla de catálogo de producto.

Especificaciones Técnicas								
Escuadrías				Escuadrías				
	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Largo (m)		Espesor (mm)	Ancho (mm)	Largo (m)	
1x2	22	45	3,2	2x2	45	45	3,2	
1x3	22	69	3,2	2x3	45	69	3,2	
1x4	22	94	3,2	2x4	45	94	3,2	
1x5	22	120	3,2	2x5	45	120	3,2	
1x6	22	142	3,2	2x6	45	142	3,2	



Ilustración 96. Madera Aserrada Qualimad Dimensionado. Producto CMPC.

5.2.2 Requerimiento 2: **El sistema estructural diseñado permitirá transformabilidad y adaptabilidad arquitectónica, frente a cambios de estilo de vida de los usuarios en el tiempo.** Se refiere principalmente al sistema constructivo diseñado para el edificio, el cuál considera dos tipologías estructurales; Estructura Primaria y Estructura Secundaria.

Como se mencionó anteriormente el primer nivel corresponderá a una estructura de Hormigón, la cual considerará una continuidad estructural en algunos ejes con el sistema estructural superior de madera, de tal manera que la transferencia de cargas sea continua hasta la fundación. Por otra parte, para responder al requerimiento de transformabilidad y adaptabilidad arquitectónica, solo se considerarán la estructura superior de madera, la cual, a través de la estructura secundaria, considerará paneles removibles que permitirá transformaciones horizontales entre departamentos y espacios “k”. Estos espacios “k” serán espacios de ampliación determinados dentro del edificio, los cuales consideran un aumento o disminución de los metros cuadrados de los departamentos aledaños. Por otra parte, también tendrá transformaciones verticales a través de su estructura primaria de losas de CLT, las cuales consideraran algunas plantas definidas para la ampliación de un departamento simple a dúplex.

A. Estructura Primaria: La estructura de madera se proyecta mediante un sistema de pilares y vigas laminadas encoladas que constituyen un retículo, inscrito dentro de una malla para modular las operaciones de las variaciones espaciales. Esta Rejilla de madera de 15 x 28 m se fabricará industrialmente a través de un diseño paramétrico robótico (*Timber Joinery Robotics*) compuesto por componentes lineales de madera laminada unidos con carpintería de armar robotizada. Los pisos, apoyados en la estructura descrita anteriormente, están contruidos con paneles de CLT de 3 capas (10 cm de espesor), sobre las cuales se colocará una capa superior de una losa de mortero [3].

Los espacios de los hogares se distribuyen de acuerdo con las operaciones con la mayor flexibilidad posible, excluyendo las zonas húmedas, las instalaciones y la circulación general, que se mantienen fijas en las bandas verticales volumétricas. Estos componentes verticales 3D determinan y limitan el número de variaciones para la metamorfosis del espacio, son prefabricados en el taller y transportados al sitio.

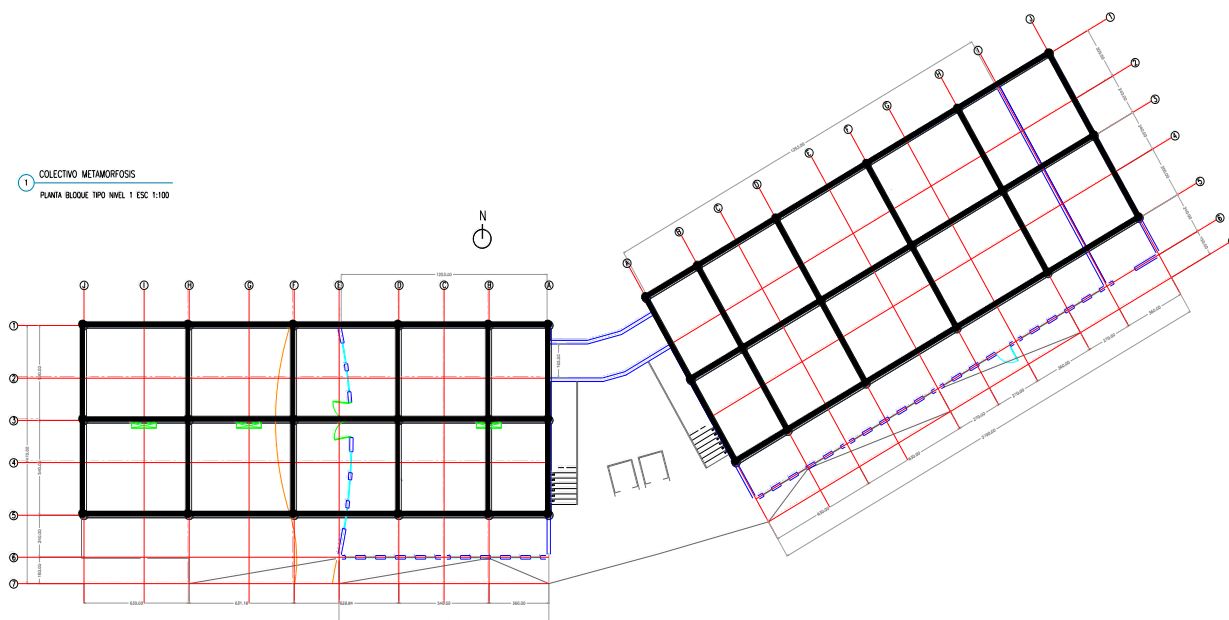
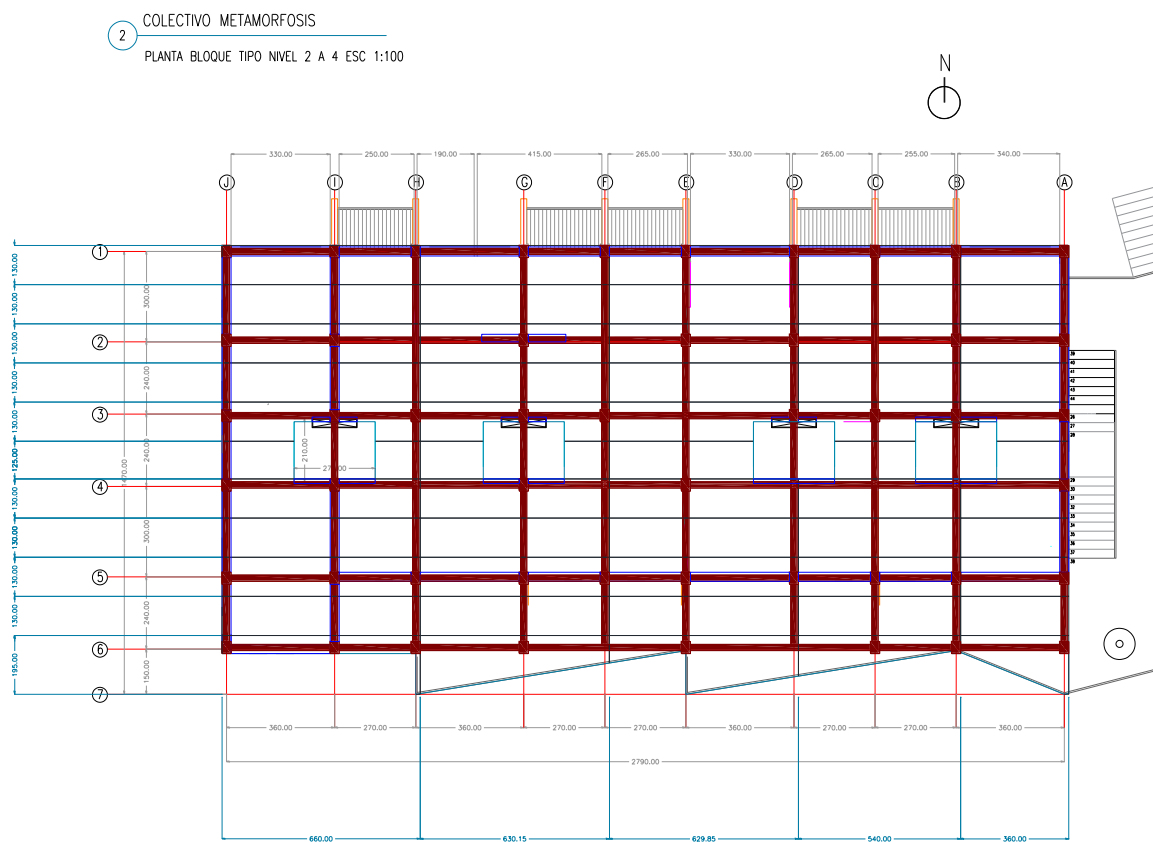
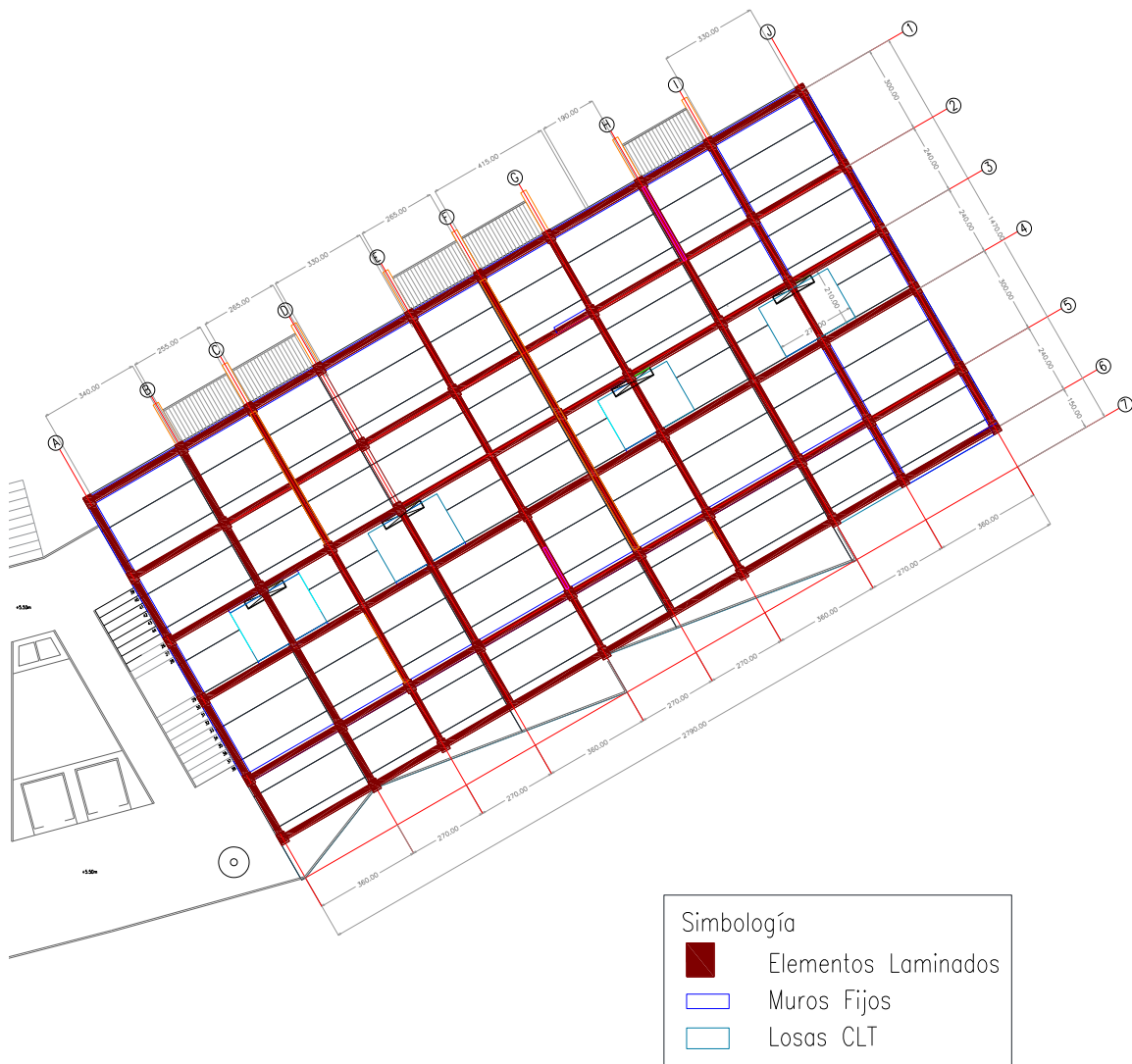


Ilustración 97. Plano Estructural Primer Nivel de Hormigón. Casa Metamorfosis.

Ilustración 98. Planta Estructural base sistema constructivo Pilar-Viga y CLT. Piso 2 al 4 Casa Metamorfosis.





El Retículo de la estructura primaria, se configura con un sistema constructivo rectangular de pilar-viga, el cual se replica de forma de espejo entre edificios y tiene como base de diseño los múltiplos de 3. La estructura central de la circulación, se encuentra separada de las estructuras de las edificaciones, de tal manera de evitar encuentros y fallas en movimientos sísmicos. En la ilustración 99, el sistema constructivo de pilar viga están graficados con llenos rojos, mientras que los muros fijos están graficados con líneas azules.

Los pilares quedan completamente conectados a las losas de CLT con uniones ocultas de acero. La estructura de madera quedará sobre una base de aisladores sísmicos sólo en los pilares continuos hasta el primer nivel de hormigón, los cuales considerarán un espacio vacío para posterior reparación o modificación.

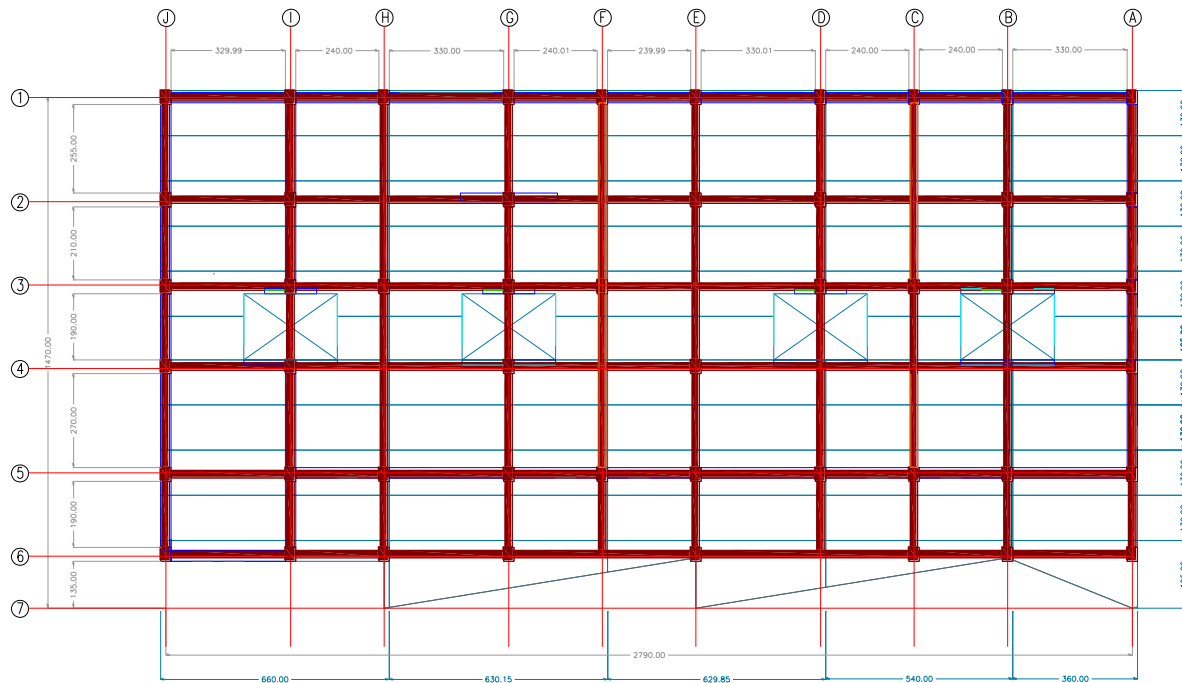


Ilustración 99. Retícula Estructural Base de Edificio Metamorfosis. Elaboración Propia.

B. Estructura Secundaria: La estructura secundaria corresponde a una proyección de paneles removibles que pertenecen a los sectores de transformabilidad arquitectónica, de tal manera que la superficie de los departamentos puede aumentar o disminuir si fuese necesario. Estos paneles se delimitan en sectores definidos dentro de la estructura primaria, de tal manera que no afecte su funcionamiento estructural base.

edificios de madera de valor patrimonial construidos en Chile como se presentó en el capítulo 3, ha desaparecido casi por completo. Es así, como la escasez de mano de obra calificada ha producido efectos negativos notables en la industria maderera, como el tiempo, la calidad y los costos de las construcciones en madera. En cambio, en países desarrollados, se ha implementado la fabricación automatizada (por control numérico computacional) en la construcción con madera. Esto ha llevado a beneficiosos resultados tanto en la precisión de la ejecución de uniones carpinteras, como en la reducción de costos.

En Chile actualmente hay aproximadamente 500 robots industriales instalados, los cuales sirven en distintas áreas de la industria, sin considerar una aplicación significativa en el área de la construcción chilena, y solo una en la industria de la madera laminada [3]. Es por esto que se pretende acortar esta brecha tecnológica, a través de una propuesta constructiva utilizando los métodos y sistemas CAR.

Un modelo preliminar del dimensionamiento del costo de producción de la estructura portante de la Casa Metamorfosis, utilizando el método y sistema CAR de entramados de madera ensamblados mediante cajas y espigas de geometría compleja, anticipa una reducción (relative gap) de al menos un 40% en el costo de fabricación robotizada de uniones carpinteras frente a cotizaciones realizadas en plantas de fabricación CNC en madera [3].

La Carpintería de Armar Robotizada ofrece una propuesta de valor basada en la prefabricación de entramados de madera ensamblados mediante uniones carpinteras de geometría compleja. De esta forma, la producción industrializada de viviendas en madera con uniones carpinteras hechas por robots nos permitirán aprovechar la industria maderera chilena, abaratar costos en uniones metálicas y aprovechar el desarrollo reduciendo los tiempos de construcción.

Considerando lo anterior, es que se propone el diseño preliminar de uniones de carpintería de armar para el sistema constructivo de Pilar-Viga, en las cuales se consideraron tres puntos críticos de diseño; unión pilar esquina con dos vigas, unión pilar central con tres vigas, y unión losa CLT y estructura primaria. Cabe destacar que dichos diseños

propuestos aún se encuentran en proceso de desarrollo, por lo que los diseños finales se validarán y definirán en el capítulo siguiente.

Los diseños de las uniones están basados en uniones definidas basadas en un marco teórico de investigación previa, las cuales no se consideran en dimensiones concretas, sino que solo en forma con aproximación a la realidad. Para estos diseños preliminares propuestos se establecen dos ensambles bases, unión de caja y espiga y unión de bufanda [40].

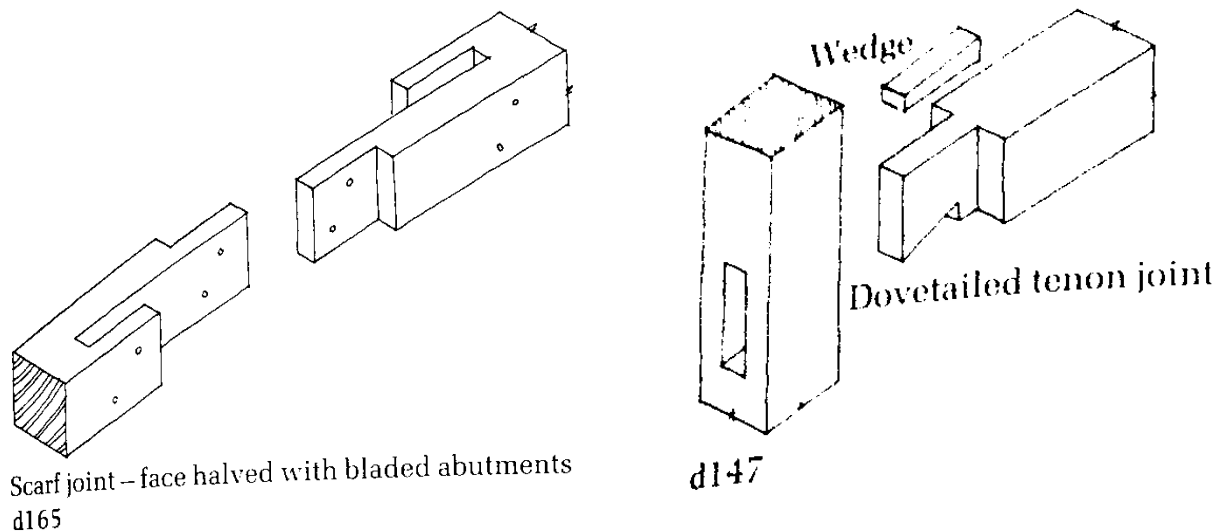


Ilustración 101. Uniones Seleccionadas del libro English Historic Carpentry, Cecil A Hewett, 1997.

Las uniones diseñadas preliminarmente, están destinadas a ser las posibles soluciones a la problemática estructural a nivel edificio, considerando la investigación previa de uniones carpinteras comprobadas en dos niveles, ya que los prototipos se estudiarán de manera individual y con mayor profundidad en el capítulo siguiente.

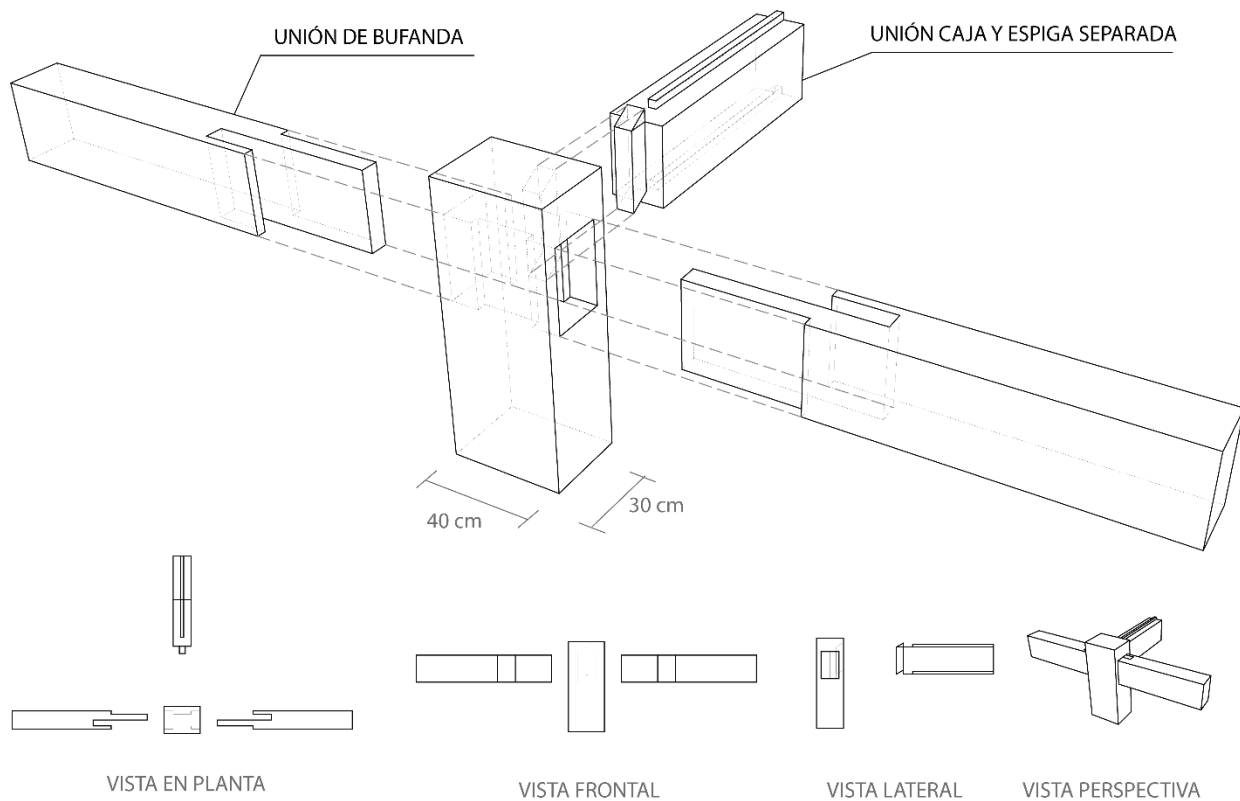


Ilustración 102. Diseño preliminar unión pilar-viga central. Elaboración Propia.

Unión diseñada para punto de unión en estructura primaria de pilar de borde central, donde se propone la intersección de tres vigas en un pilar.

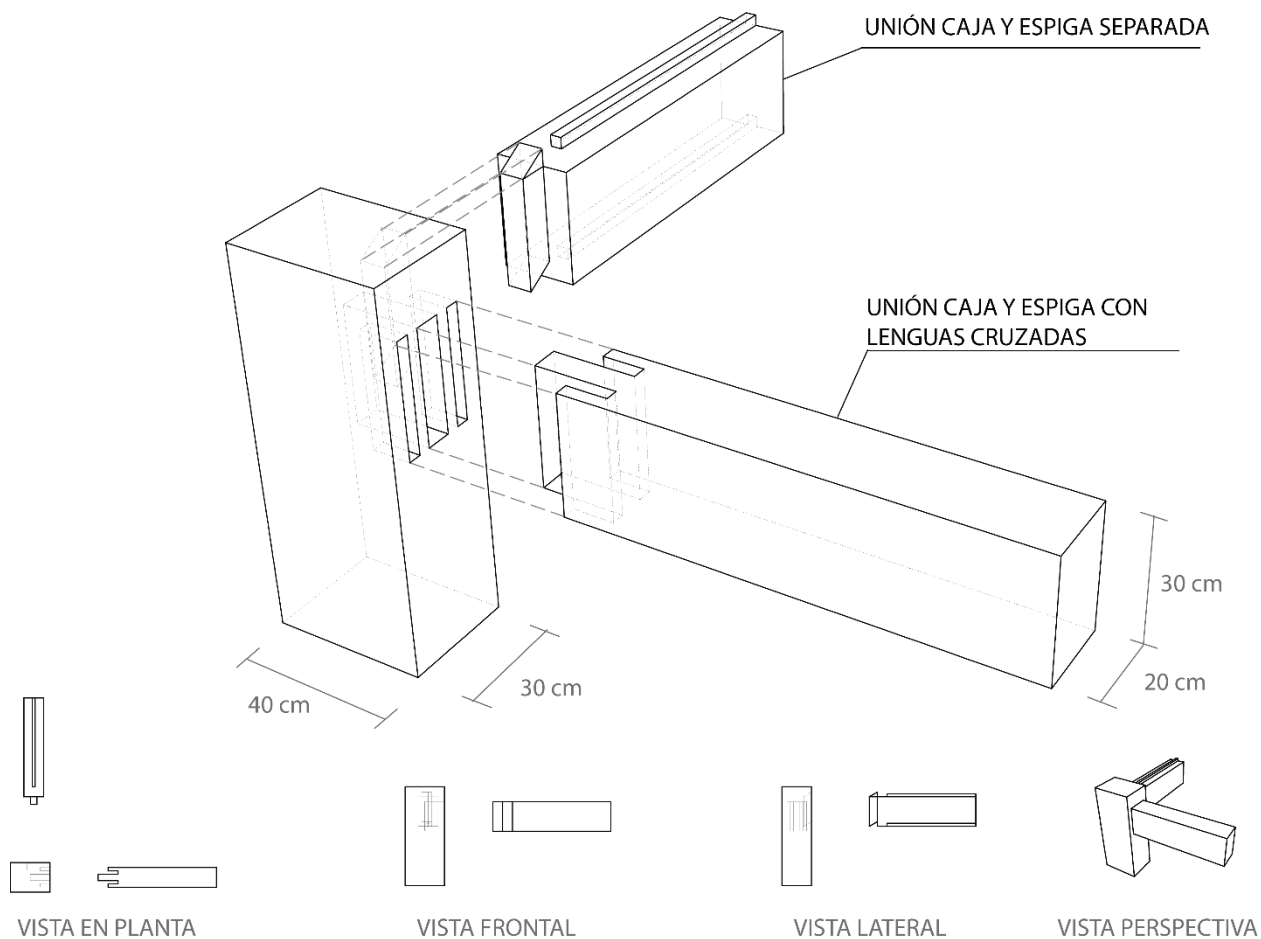


Ilustración 103. Diseño preliminar unión pilar-viga esquina. Elaboración propia.

Unión diseñada para punto de unión en esquina de la retícula estructural, en la cual se considera la unión de dos vigas y un pilar.

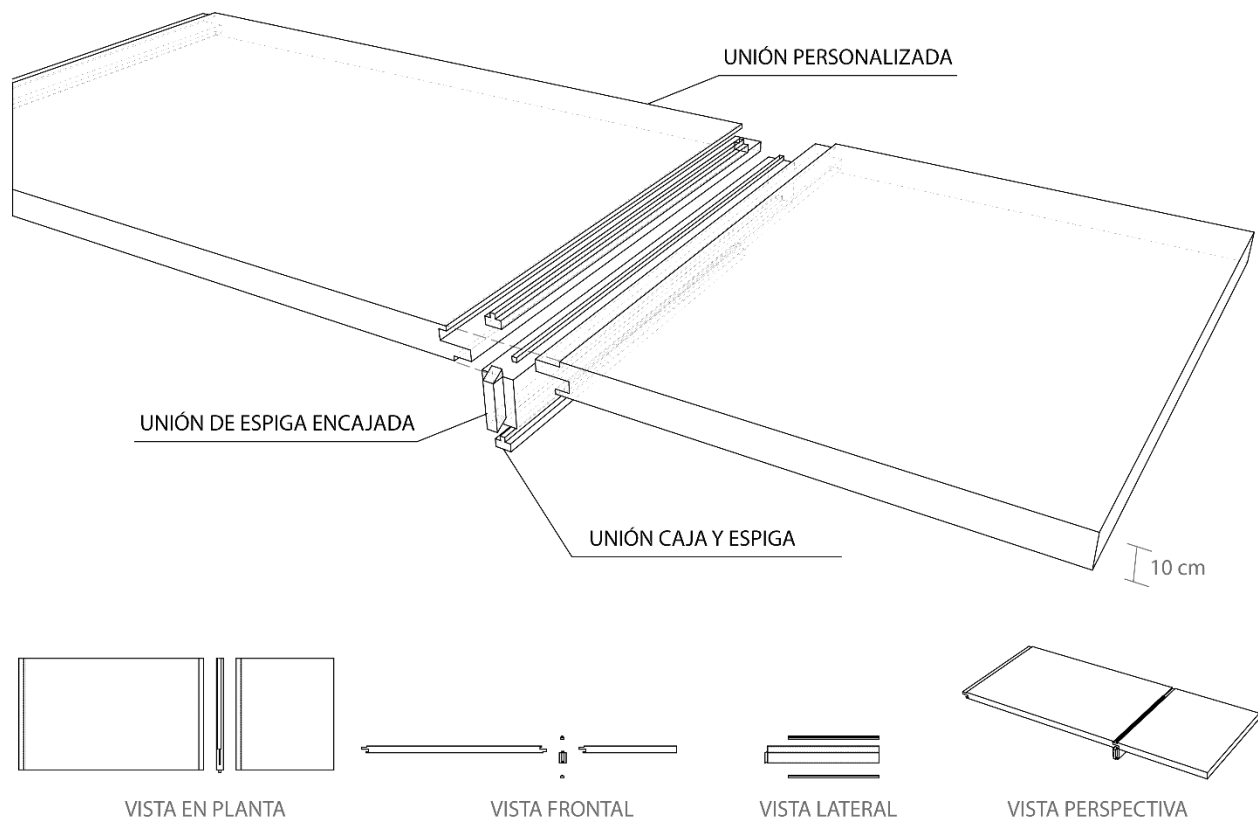
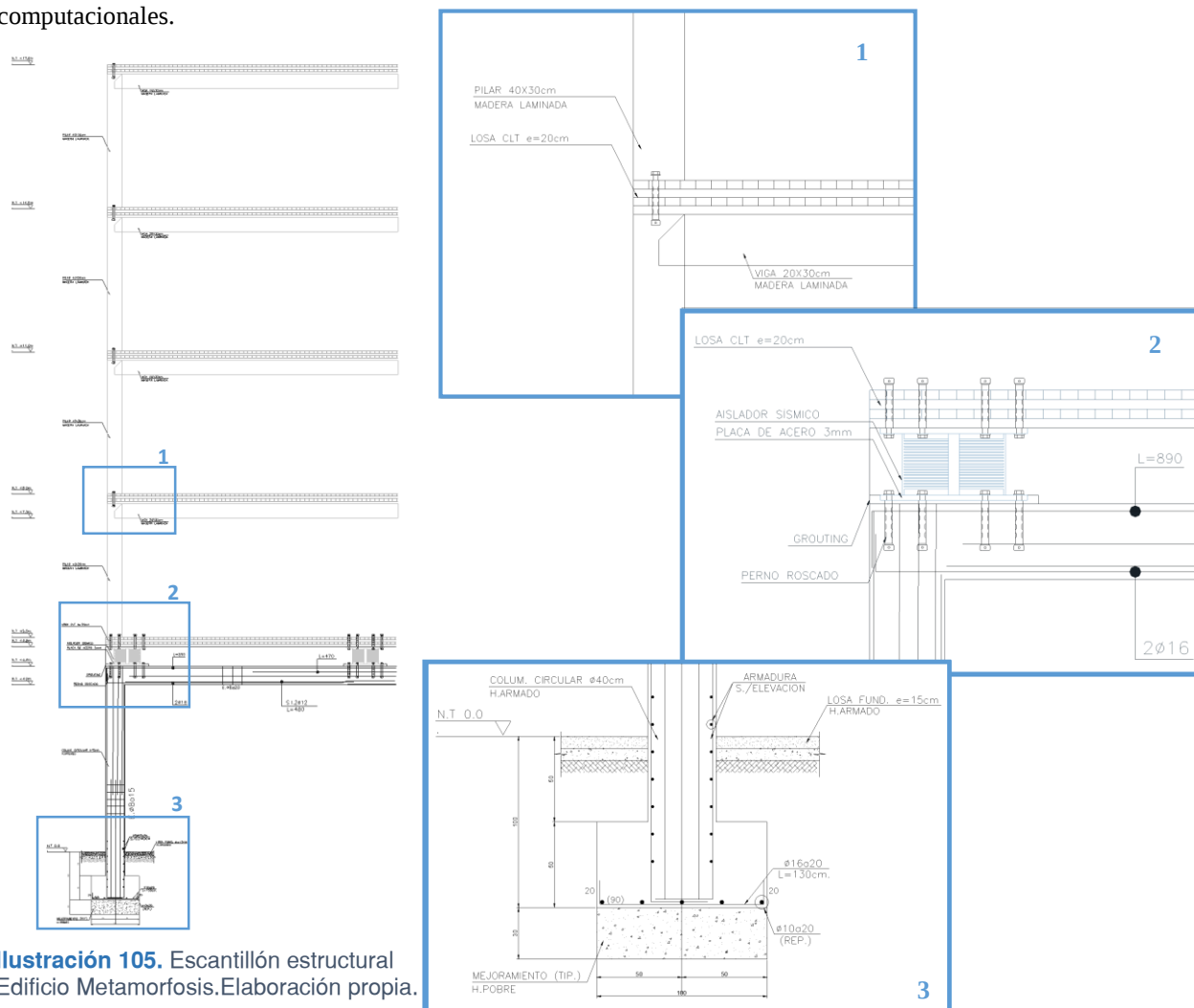


Ilustración 104. Diseño preliminar unión losa CLT con viga estructura primaria, para intersecciones interiores. Elaboración propia.

Unión diseñada como prefabricación de las piezas desde fábrica, donde se realiza un corte al borde de losa, y una caja inferior a las vigas. Además, se fabricarían piezas adicionales de unión, las que considera un soporte superior para la viga y piezas de remate inferiores y superiores.

5.2.3 Requerimiento 3: **Definir requerimientos mínimos para el cumplimiento de normas sísmicas, resistencia al fuego y prestaciones estructurales del sistema constructivo propuesto.** Para esto se define un sistema constructivo final, donde quedan definidas las alturas de los niveles y las uniones entre estructuras, para posteriores ensayos computacionales.



El diseño estructural aún está en proceso de adaptación y re-diseño, por lo que las uniones propuestas, no son las definitivas. Por otra parte, el diseño de las uniones y la estructura de los prototipos se trabaja de forma paralela, por lo que se establece una jerarquización de los requerimientos del concurso y particulares del Team Metamorfosis, lo cuales responden directamente a la normativa requerida para la estructura.

En cuanto a estos requerimientos, es que se divide la estructura en 3 áreas de estudio como se puede ver en la ilustración 105, comenzando por la unión de la estructura primaria de madera (1), la unión de ambas estructuras con los aisladores sísmicos (2) y la estructura de hormigón del primer nivel con sus respectivas fundaciones (3). Es así, como se investiga la normativa vigente que abarque esas tres áreas tanto de Chile como de USA, considerando además que debe responder a la normativa vigente en Washington D.C. Complementariamente es que se estudian otros informes de relevancia, como son la normativa europea en madera y certificaciones nacionales y europeas que puedan aportar de alguna forma al diseño final del edificio y los prototipos. Para la validación de esta normativa y requerimientos estructurales, es que se establecen 2 ejes de evaluación: Prototipos físicos y análisis computacional.

Para el análisis de prototipos se trabajará en tres áreas:

1. Análisis de Resistencia de carga de uniones: A ensayarse en Laboratorio de materiales de obras civiles (LEMCO), donde se plantearán cargas puntuales y se revisará el punto de inflexión y deformaciones, de la normativa de comportamiento estructural.



Ilustración 106. Imágenes referenciales de prototipos a ensayar. Taller Corma 1S-2018.

2. Análisis de Resistencia al Fuego: Este análisis se realizará principalmente para corroborar la característica planteada del sistema CAR, el cual establece resistir mayor tiempo la estructura al producirse un incendio antes del colapso de ésta. Es así, como se realizarán análisis comparativos de las uniones finales diseñadas con sistema CAR y las mismas uniones, pero con conectores ocultos de acero.

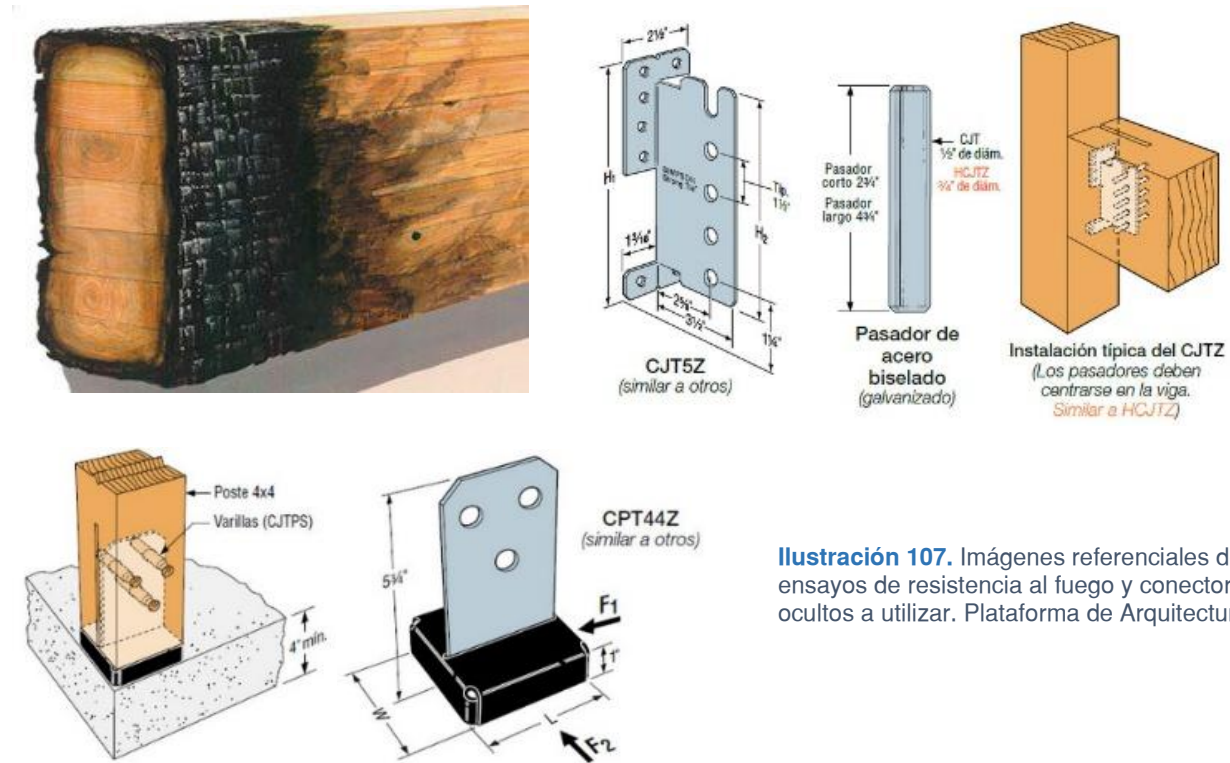


Ilustración 107. Imágenes referenciales de ensayos de resistencia al fuego y conectores ocultos a utilizar. Plataforma de Arquitectura.

3. Análisis climático del material: Este análisis se refiere principalmente al material, donde se investigará la reacción que tendrán los distintos materiales a las condiciones climáticas. Para esto se evaluarán los prototipos en distintos horarios y temperaturas, de tal manera de conocer las deformaciones que puedan producirse en los distintos materiales, y que puedan ayudar o interferir en el diseño final de las uniones.

Defectos de estructura: se producen durante el crecimiento del árbol



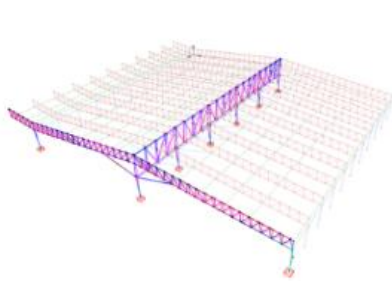
Defectos de manipulación: surgen una vez que la madera ha sido cortada



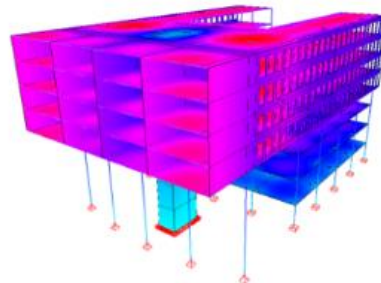
Ilustración 108. Imagen referencial de cambios en el material.

Por otra parte también se trabajarán paralelamente los análisis computacionales a nivel edificación y prototipos, los cuales consideran:

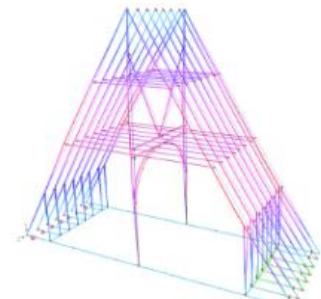
1. **Análisis Estructural:** Este análisis corresponde a las reacciones tridimensionales que puede tener la estructura frente a cargas o fuerzas puntuales aplicadas, las cuales bajo las normativas de resistencia estructural, deben considerar máximos y mínimos de deformación. Para este caso, se evaluarán de manera separada la edificación como conjunto y el prototipo de manera individual, ya que ambos consideran diseños estructurales diferentes.



Acero



Hormigón



Madera

Ilustración 109. Imagen de referencia de análisis estructural computacional de edificación en madera. BuildSoft, structurally loved by engineers

2. Análisis Sismoresistente: En Chile una de las principales características de diseño estructural, se basa en la reacción de las edificaciones al movimiento sísmico, ya que se considera como uno de los países con mayor movimiento telúrico. Es así como la solución sismoresistente de la estructura es fundamental al momento de definirla. Para esto es que se realizarán análisis computacionales tanto para el edificio como para los prototipos, considerando la mayor complejidad de reacción en la edificación mayor.

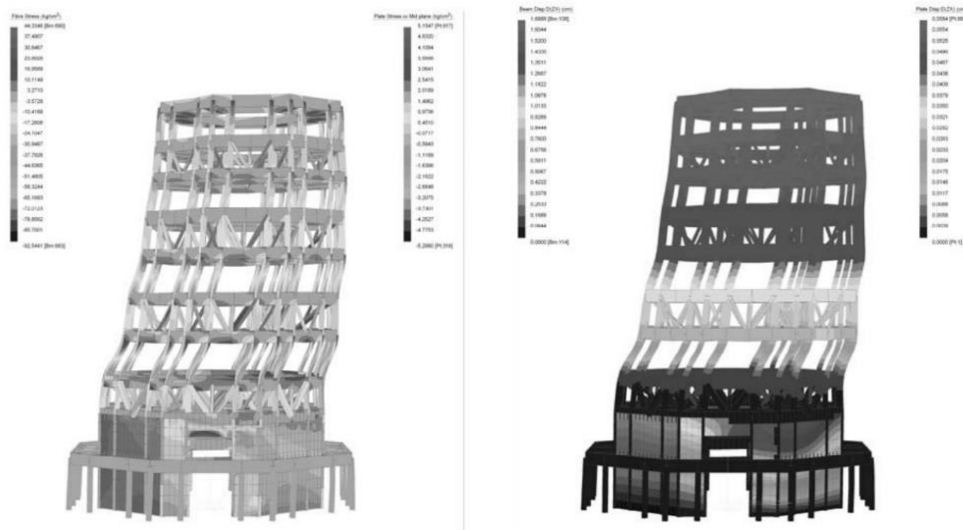


Ilustración 110. Imagen referencial de análisis sismoresistente para estructuras de madera. Análisis de Pagoda de madera.

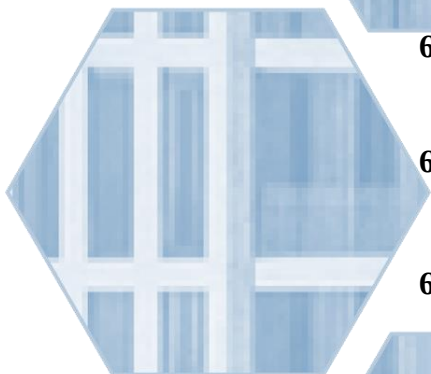
Considerando todas las soluciones mencionadas de acuerdo a la matriz de requerimientos, es que se establece la finalización del diseño estructural del edificio metamorfosis, validando los posteriores análisis que se realizarán en los prototipos. Para esto, se comienza con el diseño final para la estructura del prototipo que se construirá en Chile, en el cual se definió la fabricación de piezas en el aserradero VOIPIR, Villarrica, con el sistema robótico automatizado, y posteriormente trasladado al Parque Nacional Peñuelas en la región de Valparaíso, para ensamblaje y terminación de estructura y terminaciones.



EDIFICIO METAMORFOSIS CHILE: DISEÑO ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO

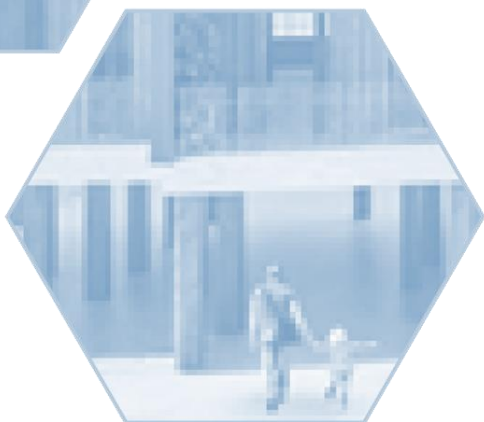


6.1 Diseño Sistema Estructural



6.2 Diseño Detalles Técnicos

6.3 Diseño Proceso Constructivo /Armado



Capítulo 6

6. Edificio Metamorfosis Chile: Diseño Estructural y análisis de funcionamiento

El edificio Metamorfosis tuvo un desarrollo de aproximadamente dos meses para la definición final de la estructura, donde las dimensiones originales se mantuvieron, modificándose solo la ubicación de pilares. En el primer nivel que se configura de hormigón armado mencionado anteriormente, la ubicación de la estructura principal se mantiene, agregando muros rígidos en el extremo libre de la retícula, brindando así una mayor rigidez de soporte a la estructura general.

Para la estructura de madera se modificó la ubicación de los pilares, donde quedó una retícula de 36 pilares en líneas transversales al rectángulo general, brindando un mayor ordenamiento estructural y proporciones en ambos sentidos. Por otra parte, el CLT se mantiene en la misma dirección y las mismas dimensiones. La nueva configuración del entramado de madera, permite tener 6 ejes rígidos, los cuales equilibran la retícula y determinan los sectores sin transformabilidad o límites de ésta.

Los vacíos centrales también se mantienen en ubicación, pero con una nueva funcionalidad dentro del desarrollo de la arquitectura del proyecto, estableciéndose como patios de luz continuos interior o exterior de las viviendas, y/o como centros de espacios comunes para las distintas tipologías de viviendas. Esto reconfigura también, los nuevos ejes de rigidez y determinando estos espacios de luz como ejes no estructurales, determinando su materialidad como vidriada o relacionada.

Por último, la nueva reconfiguración de las distintas tipologías de vivienda y su ubicación, aún continua en proceso y se determinará y explicará al final de la presente memoria, estableciendo también el diseño final del prototipo a construirse en Chile.

6.1 Diseño Sistema Estructural

Para el primer nivel se definen las dimensiones definitivas de la estructura, estableciendo el sistema constructivo de Marcos Rígidos, configurado de pilares de base circular de 50 cm de diámetro y vigas de 30 x 40 cm. Además, se incorporan los muros de hormigón armado que rigidizan los extremos de la estructura, disminuyendo el momento al volcamiento. Finalmente se define en detalle el aislador sísmico que se utilizará el cual quedará conectado directamente a las vigas de la estructura de hormigón y al envigado de suelo de la estructura de madera.

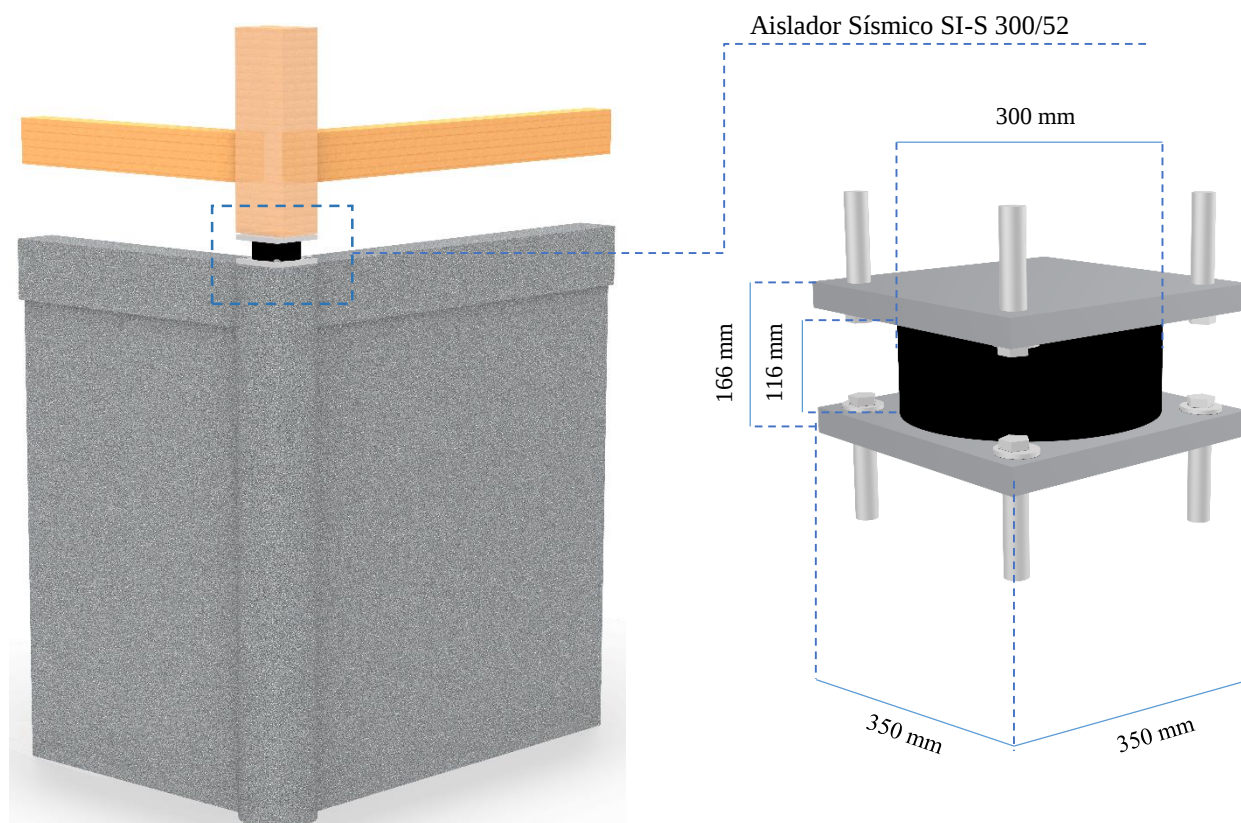


Ilustración 111. Corte estructural diseño y detalle Aislador sísmico primer nivel. Elaboración Propia.

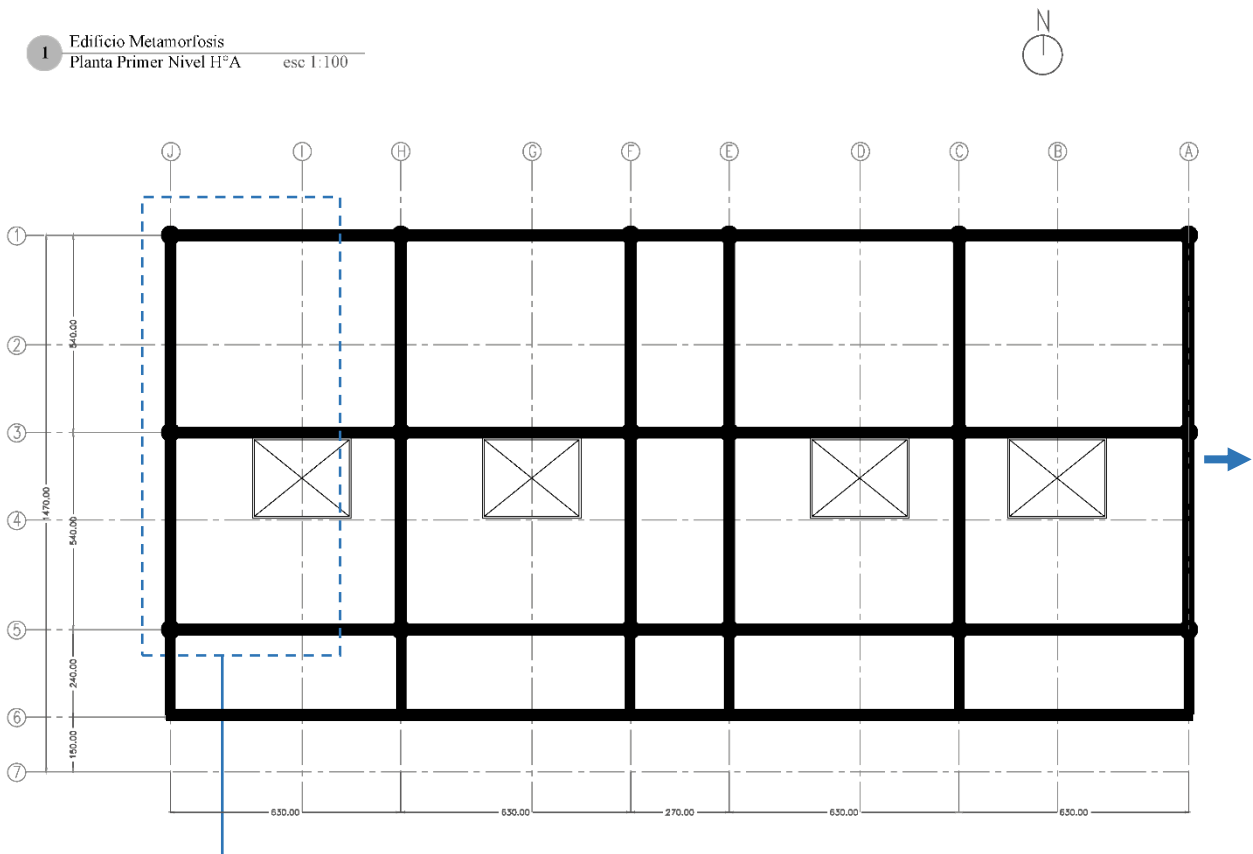


Ilustración 112. Plano estructural primer nivel Edificio Metamorfosis. Elaboración Propia.

Zona de incorporación de muros estructurales para la rigidización del primer nivel. Extremo expuesto a las áreas comunes donde no existe centro de circulaciones.

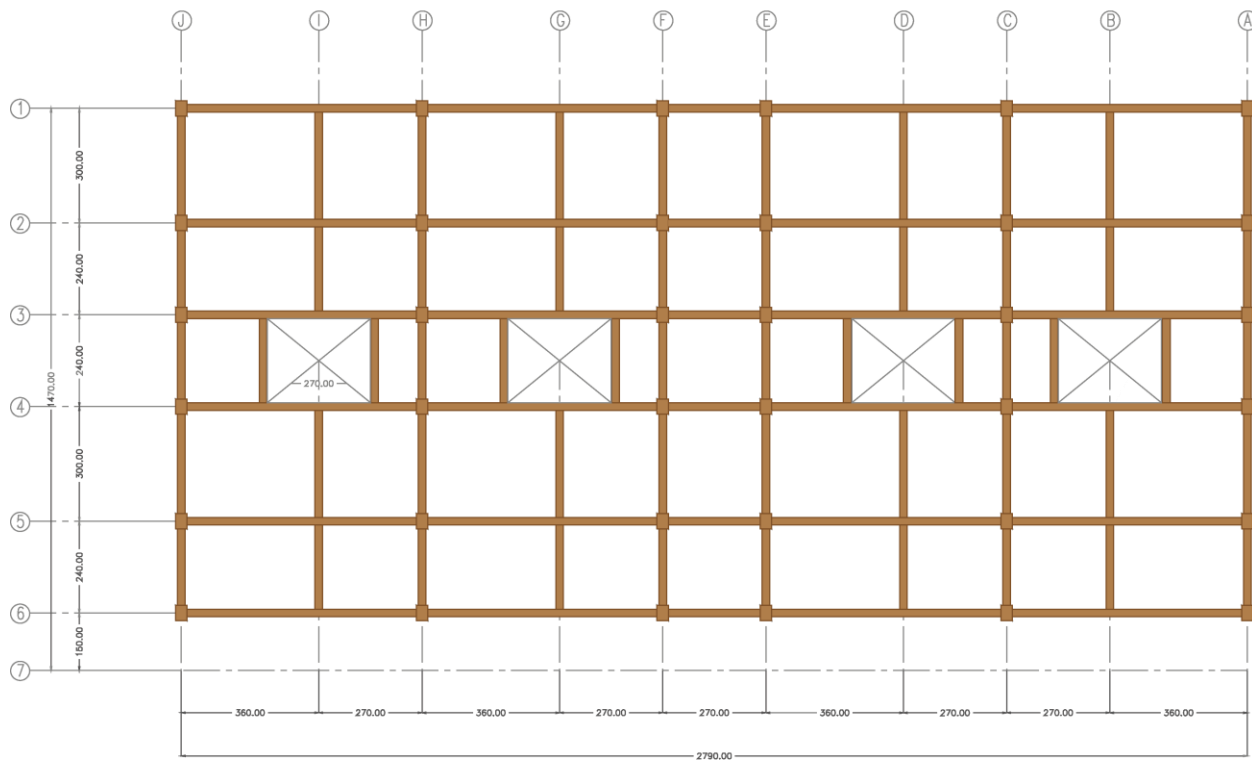


Ilustración 113. Plano estructural desde nivel 2 al 5 en madera laminada. Elaboración Propia.

Retícula continua de 36 pilares, los cuales se conforman cada dos niveles como el sistema constructivo de *Balloon Frame*. Pilares de largos de 5.60 m, los cuales se ven intersectados por las vigas intermedias y losas de CLT. Posteriormente cada dos niveles, se realiza una unión de sistema constructivo de plataforma, el cual une los 4 niveles de estructura de madera, conformando el total de la estructura.

Las alturas interiores de las viviendas se configuran en 2.4 m desde Losa a Viga y de 2.7 m de losa a losa.

Para este desarrollo de diseño estructural, se exploraron diferentes sistemas constructivos, escogiendo finalmente el que permitiese un mejor desarrollo de la propuesta de transformabilidad y las mejores condiciones de construcción y/o armado in-situ. En las ilustraciones siguientes se mostrará las distintas tipologías propuestas durante el proceso, y las diferentes aristas, pros y contras, que se consideraron al momento de decidir por la solución final.



Ventajas

- Sistema Modular de fácil ensamble.
- Menor peso sostenido por estructura primaria.

Desventajas

- Mayor m³ de Madera y CLT.
- Uniones menos continuas.
- Mayor Torque en base de pilares.
- Mayor tiempo de montaje = Mayor cantidad de elementos estructurales.

Ilustración 115. Sistema Estructural Plataforma de CLT. Elaboración Propia.



Ventajas

- Menor m³ de madera laminada.
- Menos uniones, por lo tanto, menor momento.

Desventajas

- Mayor tiempo de armado in-situ.
- Mayor Gasto de maquinarias para montaje.
- Mayor dificultad de mecanización y prefabricación.
- Se necesita arrostramiento.

Ilustración 114. Sistema Estructural de Pilar continuo. Elaboración propia

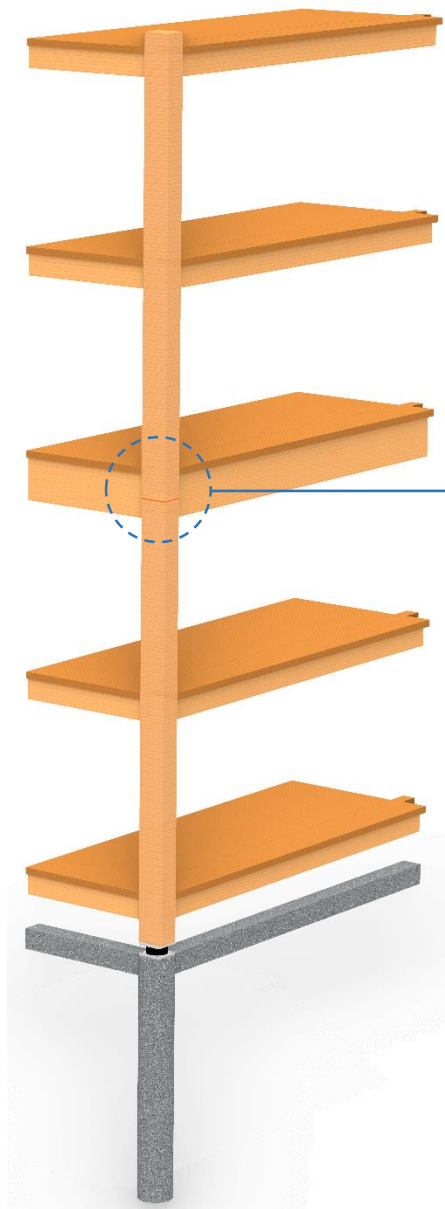


Ilustración 116. Sistema Estructural mixto doble modular con unión de plataforma. Elaboración Propia.

Ventajas

- Menor m³ de madera laminada.
- Menos uniones, por lo tanto, menor momento.
- Mayor facilidad de Prefabricación y Mecanización.
- Mayor facilidad y rapidez de Montaje.
- Mejor funcionamiento estructural.
- Sistema constructivo funcional comprobado.
- Mejor Flexibilidad espacial tanto horizontal como verticalmente.
- No necesita arrostramiento.
- Mejor aprovechamiento de las dimensiones de los elementos laminados de madera.

→ Unión de Plataforma para Módulo Inferior y Superior

Desventajas

- Piezas de mayor dimensión que en el caso 1, por lo que tendrá mayor solitud de carga estructural.
- Mayor carga para montaje.

Finalmente, este es el sistema estructural seleccionado, debido al mayor cumplimiento de requerimientos establecidos. Por otro lado, cumple con las condiciones constructivas tanto para el edificio como para los prototipos.



Ilustración 117. Perspectiva estructural Edificio Metamorfosis. Elaboración propia.

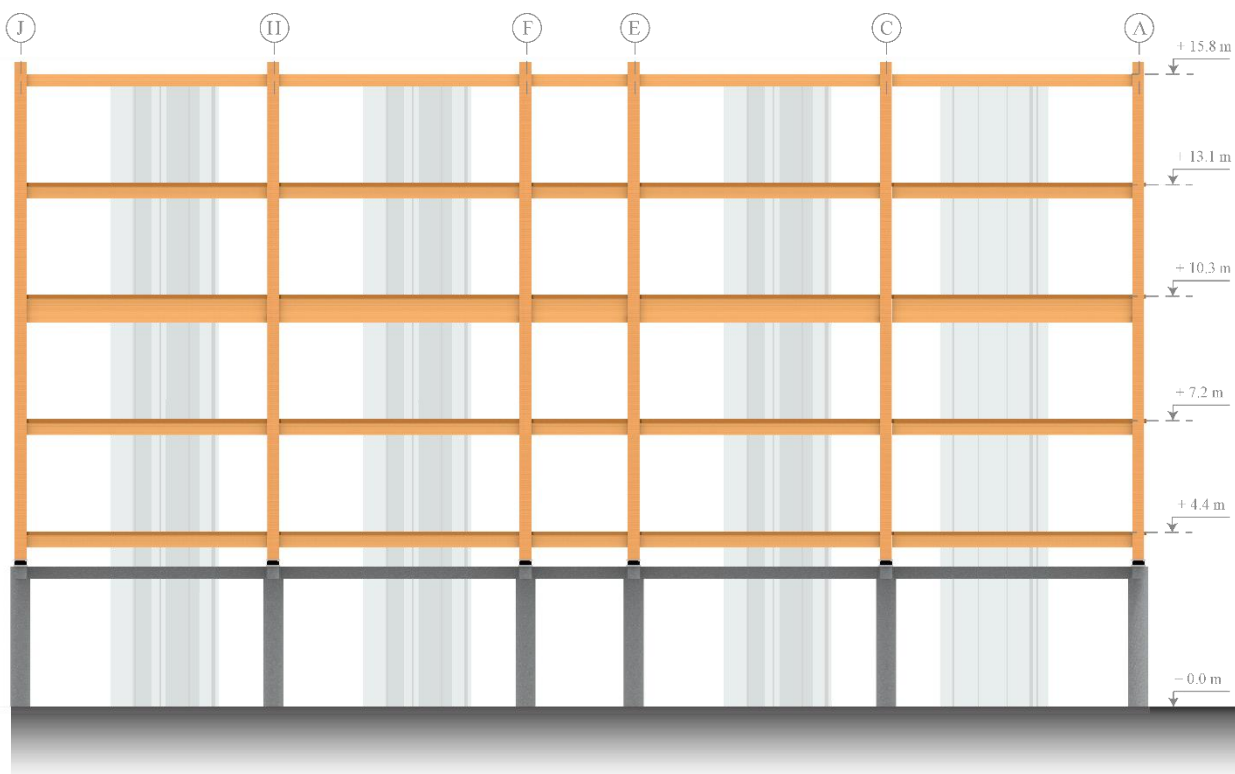
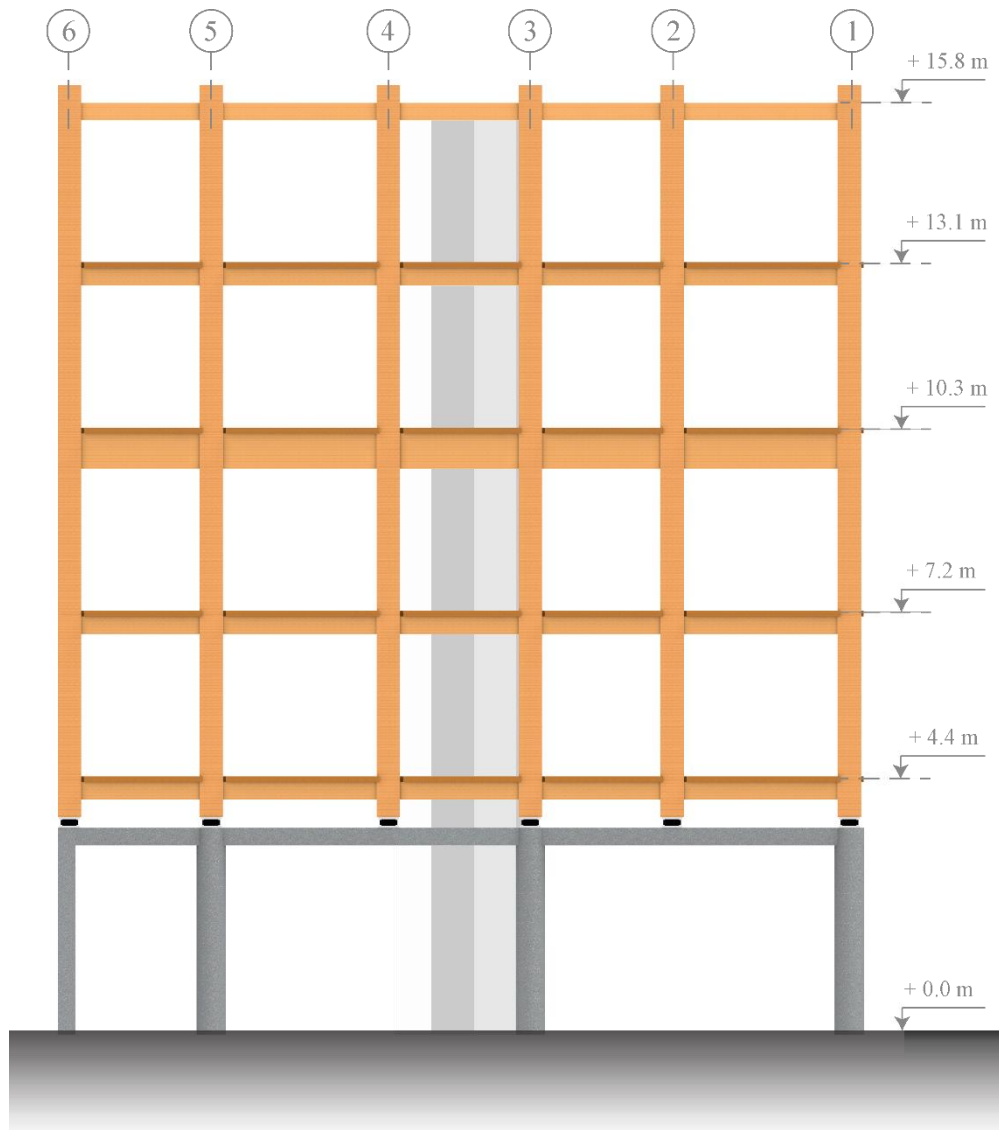


Ilustración 118. Elevación estructural frontal Edificio Metamorfosis. Elaboración Propia.

El edificio Metamorfosis en su cara Norte y Sur se estructura con un centro rígido y eje por medio lateralmente, de tal manera que entre ejes estructurales que van cada 6.30 m se creen los espacios modificables o transformables, sin necesidad de poner muros estructurales.

Los pilares se ubican de manera transversal a la crujía total del edificio, para sobre pesar las fuerzas transversales a éste. Es así, como de manera transversal a estos pilares se colocarán las vigas de mayor longitud con unión carpintera y pasadores de acero que se explicarán a continuación, brindando una mejor luz de transformabilidad interior.



Para el caso de la estructura lateral, los pilares están ubicados con su cara mayor de 40 cm y en cada uno de los ejes, de tal manera que la estructura general no necesite mayor arrostramiento.

Además, las vigas transversales al edificio están ubicadas en todos los ejes que están en esta dirección del edificio (A-J), de tal manera que a pesar de que no haya pilarización, las vigas longitudinales también queden arriostradas.

Ilustración 119. Elevación estructural lateral Edificio Metamorfosis. Elaboración Propia.

6.2 Diseño Detalles Técnicos

Para el desarrollo de los puntos de unión de la estructura, se determina analizar la mayor cantidad de posibilidades existentes en la actualidad. Para el estudio y definición de las uniones, se determinan 4 puntos de conexión, los cuales están definidos en la ilustración 120. Aquí se establecen las tipologías de unión y su definición.

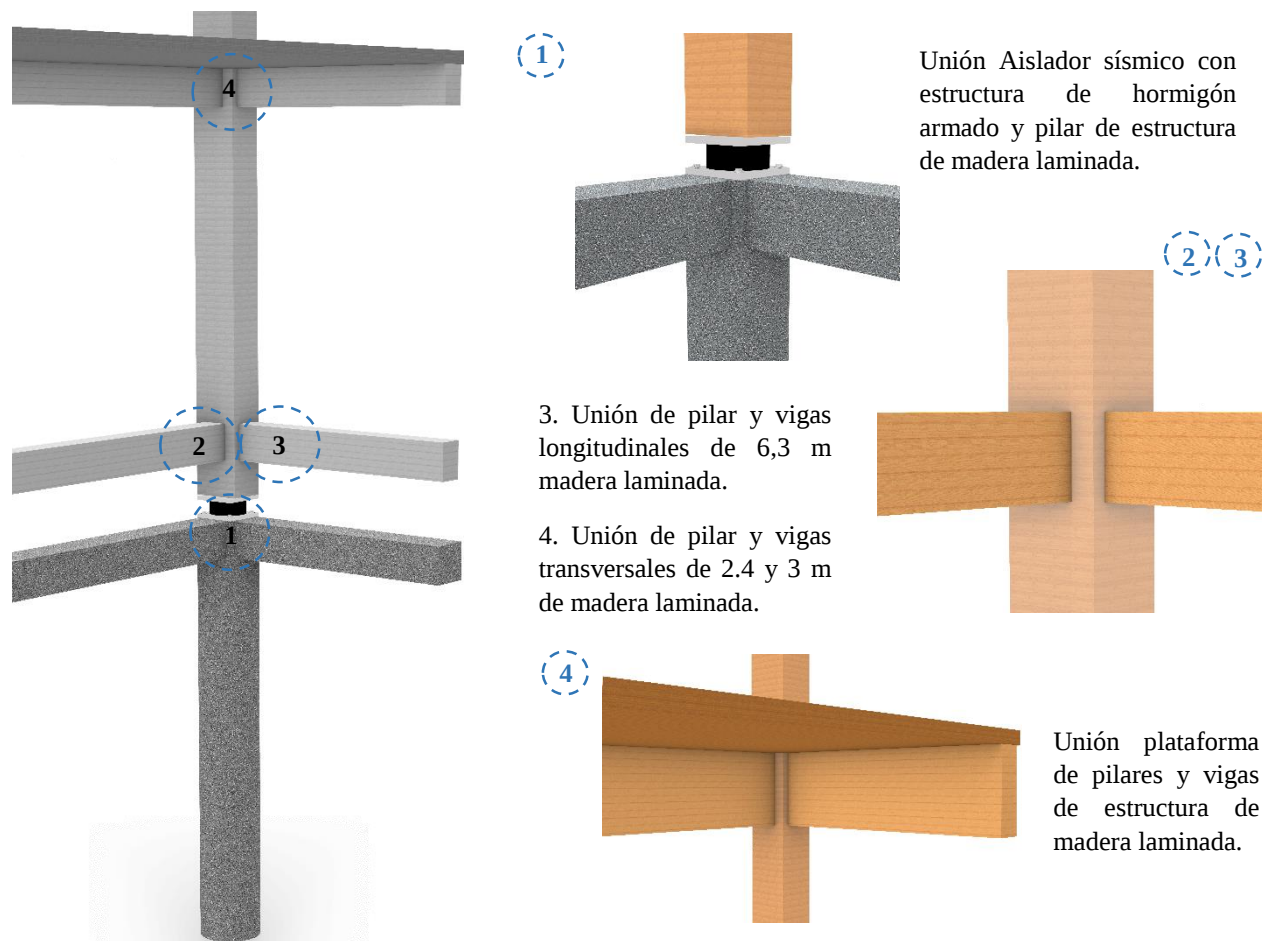


Ilustración 120. Modelo puntos de conexión de sistema constructivo. Elaboración Propia

6.2.1 Unión Aislador Sísmico con ambas estructuras:

La decisión de ubicar un aislador sísmico separando las estructuras, se origina del hecho de considerar el primer nivel como un nivel fundacional. De esta manera, y con el conocimiento obtenido de que ambos materiales reaccionan diferentes frente a un sismo, es que se considera el punto de flexión entre ambas, permitiendo así un mejor funcionamiento en la estructura de madera. Si bien actualmente no se tienen precedentes de edificaciones de mediana altura en madera con aisladores sísmicos, si se pueden encontrar precedentes de un acercamiento a esto.



Ilustración 121. Aislador Sísmico rústico elaborado en una casa al norte de Irán. Cimentación compuesta por capas entrecruzadas de troncos de madera, que ruedan una sobre la otra en caso de sismo.



Los aisladores sísmicos tienen su origen no solo en evitar los movimientos estructurales mayores, sino que también como un sistema de aislación del material con las fundaciones [41]. Es así, como se identifica en la ilustración 121, el primer acercamiento a un aislador sísmico para estructuras de madera, que considera además elementos en ambas direcciones.

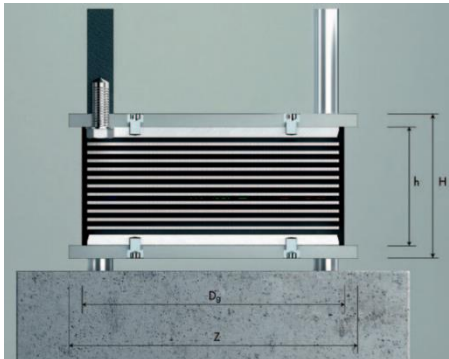


Ilustración 122. Imagen ilustrativa de las dimensiones del aislador sísmico. FIP Industriale.

En el caso del Edificio Metamorfosis, la conexión se resuelve con un sistema de aislador sísmico que separe el movimiento de ambas estructuras, y que a la vez permita una aislación de la humedad del primer nivel.

Es así como en base a las dimensiones de los elementos de hormigón (50 cm de diámetro), y las dimensiones del pilar de madera laminada (30 cm de ancho), se establece utilizar el aislador más pequeño del catálogo de FIP Industriale, el cual considera las siguientes dimensiones:

SI-S	V (kN)	Fzd (kN)	Ke (kN/mm)	Kv (kN/mm)	Dg (mm)	te (mm)	h (mm)	H (mm)	Z (mm)	W (kg)
SI-S 300/52	490	1860	0,54	584	300	52	116	166	350	84
SI-S 350/50	700	3010	0,77	779	350	50	108	158	400	109
SI-S 400/50	1150	4680	1,01	1246	400	50	108	158	450	140
SI-S 450/54	1540	5770	1,18	1369	450	54	118	168	500	183
SI-S 500/54	2230	8050	1,45	1962	500	54	118	168	550	224
SI-S 550/56	2720	9310	1,7	2153	550	56	117	167	600	265
SI-S 600/56	3200	10310	2,02	2438	600	56	114	164	650	307
SI-S 650/54	3650	10830	2,46	2848	650	54	109	159	700	351
SI-S 700/60	4460	11370	2,57	2871	700	60	125	185	750	481
SI-S 800/60	6930	14990	3,35	4519	800	60	125	185	850	624
SI-S 900/60	8480	21220	4,24	5317	900	60	126	186	950	790
SI-S 1000/70	10940	22590	4,49	5316	1000	70	146	226	1050	1214
SI-S 1100/70	14840	27460	5,43	7324	1100	70	146	226	1150	1463
SI-S 1200/80	17990	28700	5,66	7224	1200	80	156	236	1250	1750

Tabla 3. Tabla dimensiones aislador sísmico de desplazamiento de 100 mm. Elaboración Propia.

Por otra parte, en base a una investigación realizada por alumnos y profesores de la Universidad de Stanford [42], se establece los tipos de conectores a utilizar entre el aislador sísmico y el pilar de hormigón, y el aislador sísmico con el pilar de madera laminada. Debido a que las uniones entre un aislador sísmico y la estructura de madera no existe como precedente, es que se diseña en base a esta investigación.



Ilustración 123. The House That Shrugs Off an Earthquake. Equipo dirigido por Gregory Deierlein en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Stanford.



Ilustración 125. Disipador Cóncavo Deslizante confeccionado por Universidad de Standford. Uniones con fundación y entramado de piso.

Esta investigación realizada por la universidad de Stanford, consiste en una casa de 2 niveles, construida con un sistema constructivo de entramado ligero (pero con madera laminada), donde se establece una base de fundación aislada de hormigón, disipadores cóncavos deslizantes y un entramado de piso con madera laminada.

Referente a esta investigación, es que se realizan análisis respecto al funcionamiento de este disipador cóncavo deslizante, comprobando su efectividad al momento de un movimiento sísmico de gran magnitud (7.0° Richter). El objetivo principal de esta innovación es lograr menores daños estructurales al producirse un gran terremoto. Para esto, en lugar de unir la casa a los cimientos con una serie de pernos fundidos en el concreto, como suele realizarse, la casa se construyó sobre una docena de aisladores planos y en forma de cuenco hechos de acero.

El marco del piso está soportado por pasadores con punta de plástico que descansan sobre los aisladores. Durante un terremoto, la base puede moverse debajo de la casa sin dañarla. Los aisladores cóncavos evitan que el marco se salga de la base y cuando se detiene el temblor, su forma ayuda a que la casa vuelva a su posición original.

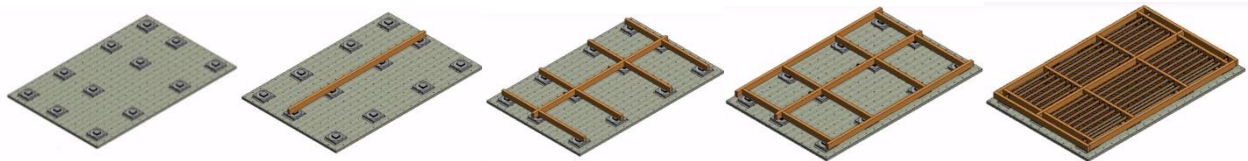


Ilustración 124. Secuencia de instalación de disipadores cóncavos deslizantes y estructura de madera. Universidad de Standford.

“Deierlein dice que construir una casa rígida y agregar aisladores sísmicos agregaría entre \$7.250.000 y \$11.000.000 al precio de 139 m2 a 186 m2 y alargar el cronograma de construcción en 4 días. Pero los costos adicionales serían mínimos en comparación con el monto anual promedio de \$500.000 para pagar los seguros contra terremotos” [42].

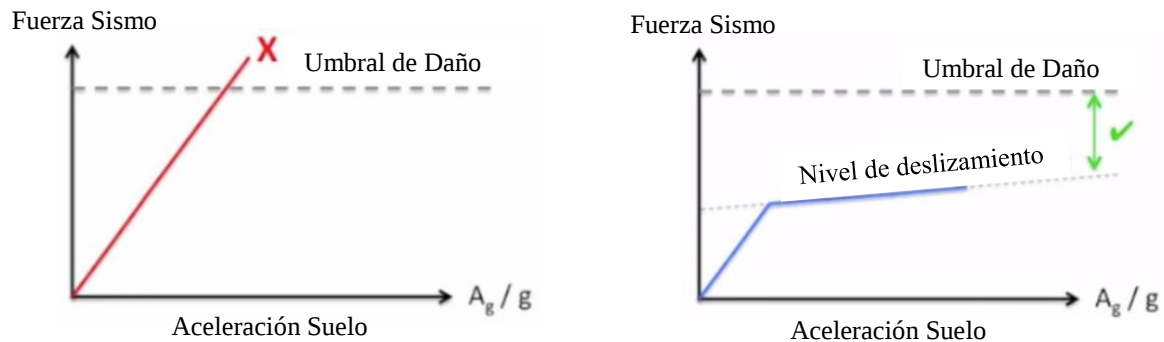


Ilustración 126. Gráficos comparativos de funcionamiento con y sin disipador cóncavo deslizante. Ensayo sismo-resistente U. Stanford.

6.2.2 Uniones de Carpintería de Armar Robotizada:

El diseño de uniones específicas para edificaciones en madera de altura es un factor crítico. Los componentes de madera ingenieril deben ser fabricados con altos niveles de precisión para garantizar mínimas tolerancias y un calce adecuado. Consecuentemente, es requerido el uso de herramientas de control numérico o robots. El cuidado en el diseño, análisis y fabricación de la geometría de la unión asegura la correcta transmisión de cargas a través de uniones carpinteras anaeróbicas de gran superficie de contacto. Conjuntamente, debido a su comportamiento térmico –puentes térmicos o incluso fuego— las estructuras de madera ingenieril en altura corren con ventaja respecto del acero u hormigón armado [2].

En el caso de las uniones con el sistema CAR, primero se estudia las direcciones de los elementos (compresión o flexión) y posteriormente la funcionalidad que cumple dentro de la estructura, es decir, si es un elemento rígido o no. Para esto, se realiza una investigación previa de los tipos de uniones existentes y algunos precedentes constructivos actuales de la aplicación de la carpintería de armar con robótica.

Para las uniones de vigas 2 y 3, se analizaron variadas alternativas. Primero contemplando ambas uniones con carpintería de armar, y finalmente estableciendo solo las uniones de las vigas de mayor luz, es decir, las longitudinales con uniones carpinteras y las transversales al edificio con conectores de acero que se explicarán posteriormente. Esta decisión se debe principalmente a requerimientos propios del concurso Solar Decathlon y los sponsors.

Entonces, para la unión número 2, que corresponde a la unión entre las vigas longitudinales de 6.3 m con los pilares, se establece la unión de ensamble de caja y espiga con espera y pasadores, proveniente del libro “Uniones carpinteras de Valparaíso” [43]. Ésta unión, también fue utilizada y desarrollada en el proyecto partícipe del concurso de arquitectura de CORMA 2018 Stermotib, en el cual desarrollé el sistema estructural primario y secundario.

La unión de caja y espiga con espera consiste en encajar en la cara de un miembro vertical el extremo de otro horizontal, haciendo en el vertical dos cortes: un rebajo denominado espera, y una caja generalmente abierta en el tercio central del semiplano inclinado o vertical respectivamente. Consecuentemente, en el miembro horizontal se hace un recorte denominado espiga bilateral, que recorta un tercio del ancho de la testa del miembro por ambos lados opuestos, dejando hombros verticales o inclinados....Las mejillas de la espiga bilateral y las paredes adyacentes de la caja se pueden perforar de manera ligeramente excéntrica y ser atravesadas por una clavija o pasador, para impedir que la unión se desarme en dirección o sentido distintos de aquel en que fue montada [43].

Las uniones entre vigas longitudinales y pilares, van formando marcos rígidos de dos niveles de altura. Estos marcos primero se construyen de manera horizontal en suelo y luego son alzados verticalmente, uniéndolos con aisladores sísmicos que coronan la estructura de hormigón. Posteriormente, se rigidizan con las vigas transversales en sentido opuesto, uniendo los marcos para conformar los distintos módulos. Este proceso constructivo será explicado con mayor detalle en el punto siguiente 6.3 del capítulo.

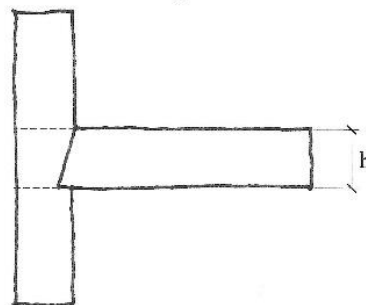
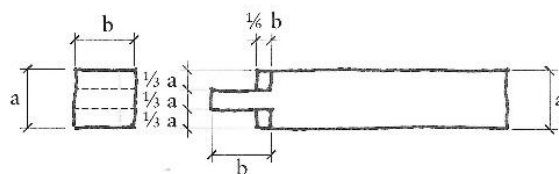
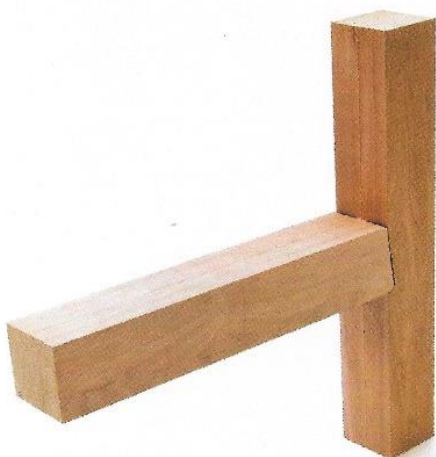
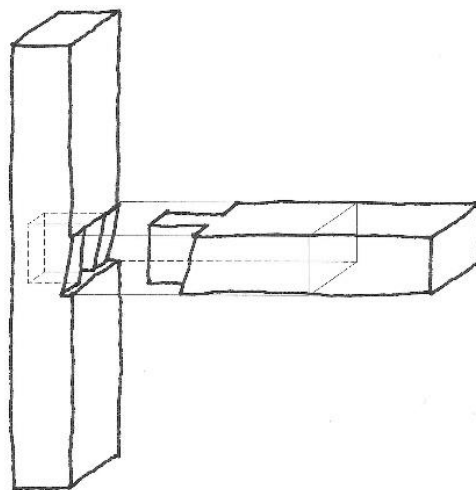
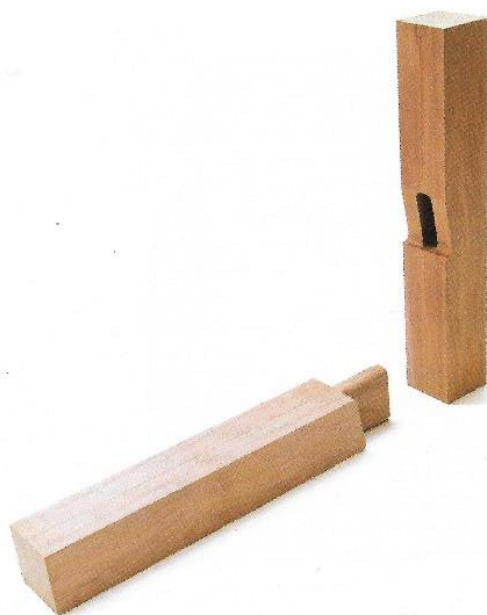


Ilustración 127. Ensamble de caja y espiga con espera. Uniones Carpinteras de Valparaíso LF.González y S.Maino.

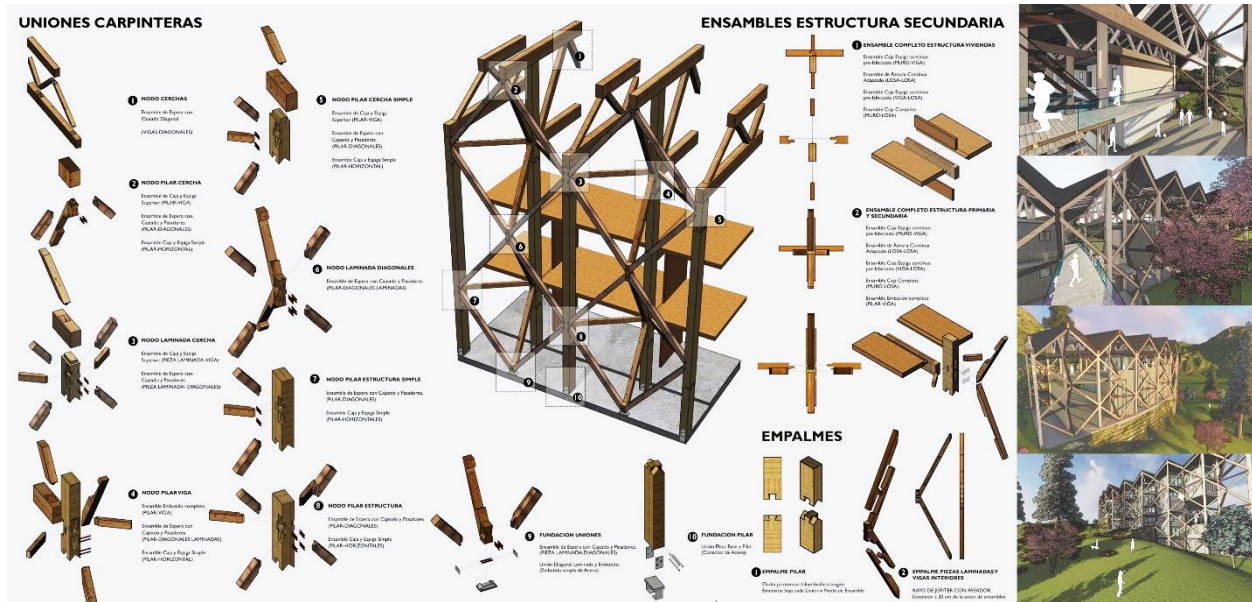


Ilustración 128. Lámina catálogo técnico, ensambles estructura primaria Edificio STERMOTIB, Concurso Corma 2018. Elaboración Propia.

6.2.3 Uniones con conectores de acero:

La utilización de uniones de madera o sistema CAR, tiene mayores ventajas que la utilización de conectores de acero. Por ejemplo, el acero pierde su capacidad estructural en un incendio al llegar a los 600°C, y esto puede ocurrir durante los primeros 20 y 30 minutos del siniestro. En ese momento, la fluencia del acero, es decir, su deformación irre recuperable, hace que estas uniones se comporten como si fuesen goma y ceden estructuralmente. En cambio, la madera es un material que contiene bajos niveles de conductividad térmica; y ante un incendio, la madera ingenieril añade también la gran virtud de formar una capa carbonizada superficial, protegiendo sus propiedades físicas y estructurales ya que el interior permanece intacto [2].

La madera es un material combustible que quema lentamente, en presencia de incendio se produce una reducción de la sección resistente, pero la parte no afectada por la carbonización continúa siendo eficaz. En cambio los materiales metálicos sufren una reducción drástica de las capacidades mecánicas con altas temperaturas [44]. Sin embargo, la conexión metálica adecuadamente protegida y aislada de la madera, no sufre reducción de resistencia y preserva las propiedades mecánicas durante el tiempo requerido. (Ej. R45=45 minutos). Es por esto que, se decide que como primera opción las uniones de acero a utilizar serán ocultas.

Para determinar los tipos de uniones a utilizar, primero se realiza un catastro de los puntos estructurales que requieren algún refuerzo o unión metálica. Posteriormente se escoge al proveedor de conectores de acero que será uno de los sponsors en el concurso Solar Decathlon, Rothoblaas, el cual contiene un largo listado de conectores ocultos para madera, los que trabajan bajo el mismo concepto del sistema CAR para una mayor resistencia al fuego. Finalmente se realiza un listado de los conectores y refuerzos a utilizar, dependiendo de las dimensiones y las solicitudes del proyecto Metamorfosis. Para la selección del tamaño del conector, se debe escoger según dimensiones de elementos a unir, como se ve en la ilustración 130:

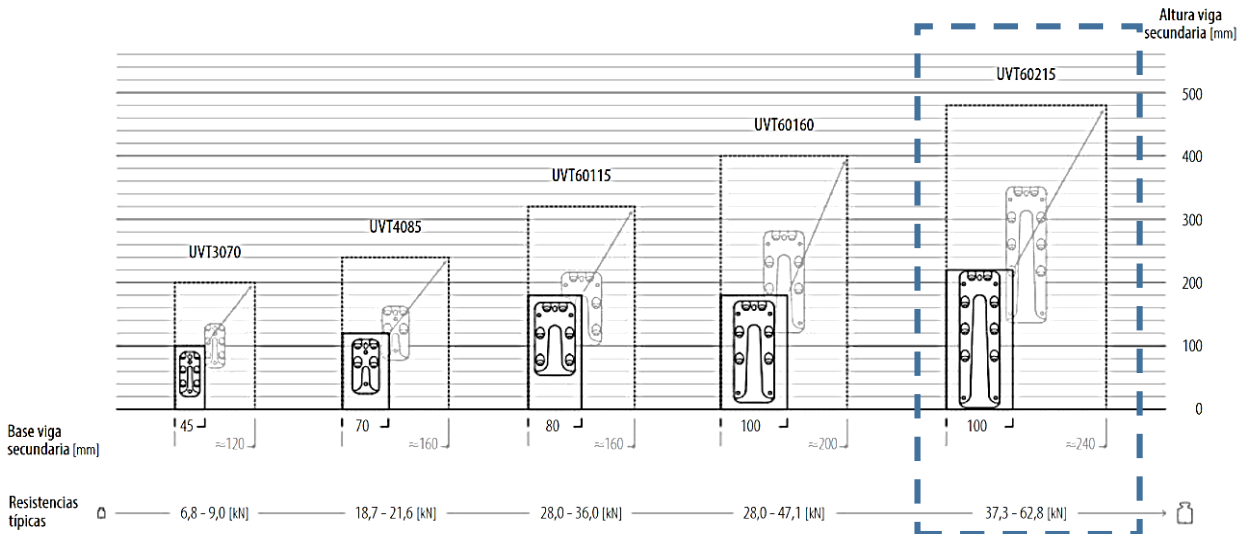


Ilustración 129. Tabla de selección de tipo de conector según dimensiones de elementos a unir. Rothoblaas.

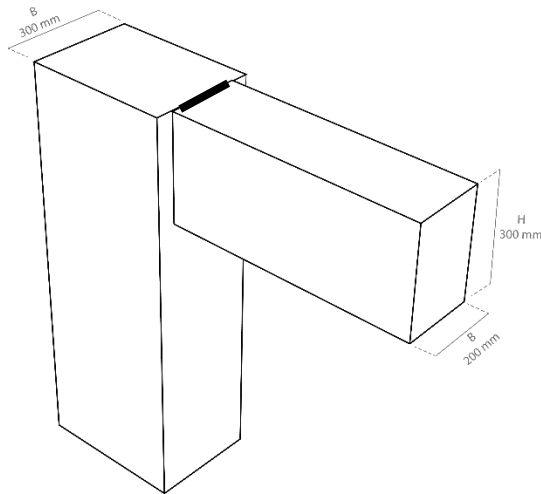


Ilustración 130. Geometría de la unión para selección de conector. Elaboración propia.



Ilustración 131. Ejemplo de aplicación de conector oculto. Rothoblaas catálogo conectores de madera 2019.

La gama de conectores ocultos UV-T para uniones de madera-madera está compuesta por 5 artículos, a elegir en función de la carga aplicada sobre la unión y de las dimensiones de la viga secundaria. Cada conector posee resistencias diferentes, en función de la longitud de los tornillos utilizados. Según la altura de la viga secundaria (H) DE 300 mm y la base de la viga primaria (que en este caso es el pilar) B de 300 mm se escoge el conector oculto **UV-T60215**, el que, si bien no cumple con las medidas exactas de la base del pilar, de igual forma funciona según las características de carga y resistencias 65 kN.

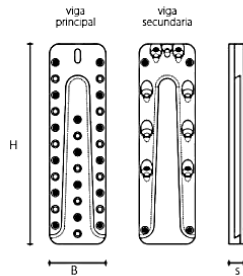
El sistema de conexión no es un nodo puntual, pero consta de varios elementos que interaccionan entre ellos. La conformación geométrica de la conexión genera solicitaciones adicionales, tracción sobre las fijaciones y compresión sobre el elemento principal.

Los conectores están completamente incorporados en los elementos de madera para el máximo resultado estético, además los valores de resistencia están certificados con marcado CE, calculables según ETA y procesados por Rothoblaas según proyecto.

Para una mejor comprensión de las distintas solicitudes y características correspondientes al conector seleccionado, se adjunta la ficha técnica:

UVT60215

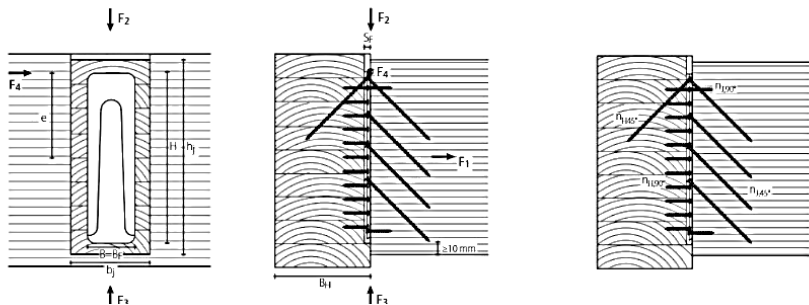
DIMENSIONES MÍNIMAS DE ELEMENTOS DE MADERA



CONECTOR UV	TIPO TORNILLOS 45°	VIGA PRINCIPAL			VIGA SECUNDARIA ⁽¹⁾	
		B x H x s [mm]	Ø x L [mm]	FRESADO B _F [mm] S _F [mm]	b _L MIN [mm]	h _L MIN [mm]
UVT60215	60 x 215 x 16 VGS Ø6 x 100 VGS Ø6 x 160		80 120	60 16	100 100	220 260

FIJACIONES

		VIGA PRINCIPAL		VIGA SECUNDARIA	
tipo	clavado	$n_{1,90^{\circ}}$ [unid.- Ø]	$n_{1,45^{\circ}}^{(2)}$ [unid.- Ø]	$n_{1,90^{\circ}}$ [unid.- Ø]	$n_{1,45^{\circ}}$ [unid.- Ø]
UVT60215	total	● + ○	30 - LBS Ø5	7 - VGS Ø6	4 - LBS Ø5
	parcial ⁽²⁾	●	16 - LBS Ø5	7 - VGS Ø6	8 - VGS Ø6
				4 - LBS Ø5	4 - VGS Ø6



VALORES ESTÁTICOS CARACTERÍSTICOS - UNIÓN MADERA / MADERA

UVT60215		CLAVADO TOTAL ● + ○		CLAVADO PARCIAL ●	
		TIPO TORNILLOS 45°		TIPO TORNILLOS 45°	
		VGS Ø6 x 100 [kN]	VGS Ø6 x 160 [kN]	VGS Ø6 x 100 [kN]	VGS Ø6 x 160 [kN]
TIPO TORNILLOS 90°	LBS Ø5 x 50	R _{1,Rk} 2,90 R _{2,Rk} 37,34 R _{3,Rk} 4,67 R _{4,Rk} 3,37	2,90 62,79 7,85 3,37	2,90 18,67 4,67 2,78	2,90 31,40 7,85 2,78
	LBS Ø5 x 60	R _{1,Rk} 3,53 R _{2,Rk} 37,34 R _{3,Rk} 4,67 R _{4,Rk} 3,53	3,53 62,79 7,85 3,53	3,53 18,67 4,67 2,90	3,53 31,40 7,85 2,90
	LBS Ø5 x 70	R _{1,Rk} 4,16 R _{2,Rk} 37,34 R _{3,Rk} 4,67 R _{4,Rk} 3,68	4,16 62,79 7,85 3,68	4,16 18,67 4,67 3,03	4,16 31,40 7,85 3,03

Ilustración 132. Ficha técnica conector UV-T 60215. Rothoblaas catálogo conectores de madera 2019.

Una de las mayores dificultades de la instalación de este conector, es que, si bien en el catálogo se menciona que es de fácil y rápida instalación, en la realidad no es así. Esto se debe principalmente a que las perforaciones y fisuras que se deben hacer previamente en los elementos de madera, se realizan de forma manual, por lo que no son exactas y eso produce que el conector no funcione correctamente.

Es por esta irregularidad del trabajo previo a la instalación del conector, que se pretende utilizar la manufactura robótica para su solución, de tal manera que no solo se piense dentro del sistema constructivo como una utilización del sistema CAR, sino que además funcione de manera complementaria con el resto de las uniones. Brindando una mayor precisión y un funcionamiento más eficiente.

6.3 Diseño Proceso Constructivo / Armado

El proceso constructivo del edificio, se basa principalmente en el requerimiento 1, el cual establece un proceso constructivo sustentable en todas sus fases. De esta manera, es que se propone un sistema constructivo prefabricado y modular, creando una retícula proporcional desde su eje central en dirección x e y.

A partir de este requerimiento, es que se define el ensamblaje in-situ por tramos o módulos, los cuales son replicables dentro de la misma retícula, de tal manera que exista la posibilidad de un desmontaje rápido si en algún momento se pretende reutilizar. Para esto, se definen dos ejes de armado; el tramo longitudinal, que corresponde como se mencionó anteriormente a la viga de mayor luz 6.3 m visibles entre pilares, y el tramo transversal que corresponde a las vigas de menores dimensiones 2.4 y 3 m que serán las que rigidizarán los marcos longitudinales. Primero se comienza con la construcción in situ de las fundaciones de hormigón armado, con el proceso de excavaciones y movimiento de tierra. Luego se realiza la losa de fundación que sostendrá la estructura del primer nivel, estableciendo la ubicación de los pilares de hormigón. Posteriormente comienzan los pasos principales para su construcción:

1. Construcción y relleno de los marcos rígidos de hormigón armado que conforman el primer nivel.
2. Relleno de primer nivel con muros rigidizantes.
3. Ubicación e instalación de Aisladores sísmicos.
4. Armado de marcos rígidos con uniones carpinteras de manera horizontal.
5. Alzado de marcos y uniones de pilares con estructura de hormigón.
6. Ubicación de vigas transversales que rigidizarán los marcos.
7. Repetición de proceso de ensamblaje de marcos y alzado para posterior ubicación. Pasos 4 al 6 para conformación de Módulo 1, correspondientes al 1er y 2do Nivel.
8. Colocación de losas de clt, previamente seccionadas para instalación.
9. Repetición de pasos del 4 al 7 para conformación del entramado de madera laminada niveles 3 y 4. (Módulo 2)
10. Colocación de planchas de CLT correspondientes a la planta del 3er y 4to nivel de madera laminada.
11. Conformación de la estructura secundaria e instalaciones.

12. Terminaciones y desarrollo de fachada.

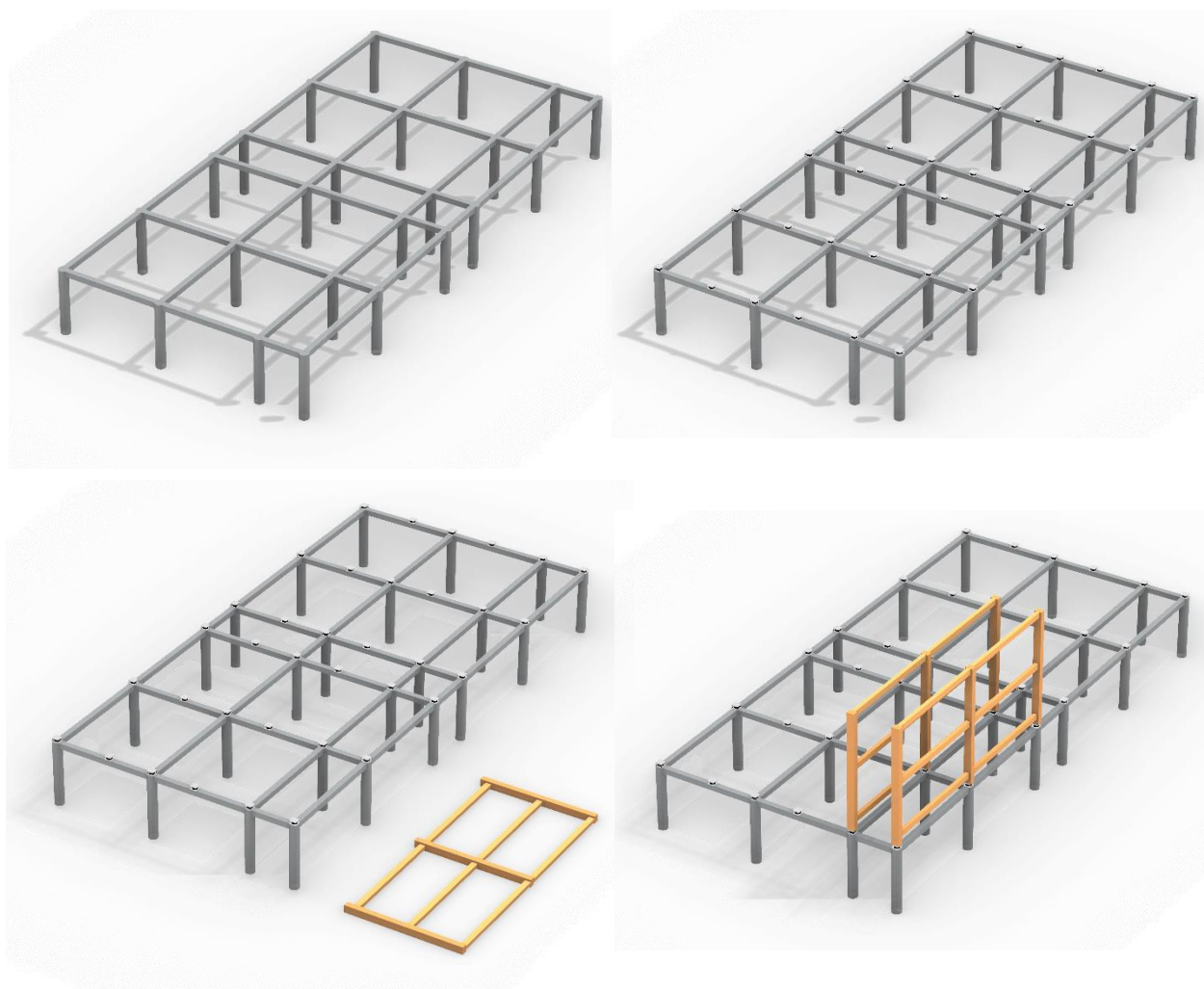


Ilustración 133. Proceso de armado Edificio Metamorfosis pasos 1 al 5. Elaboración propia.

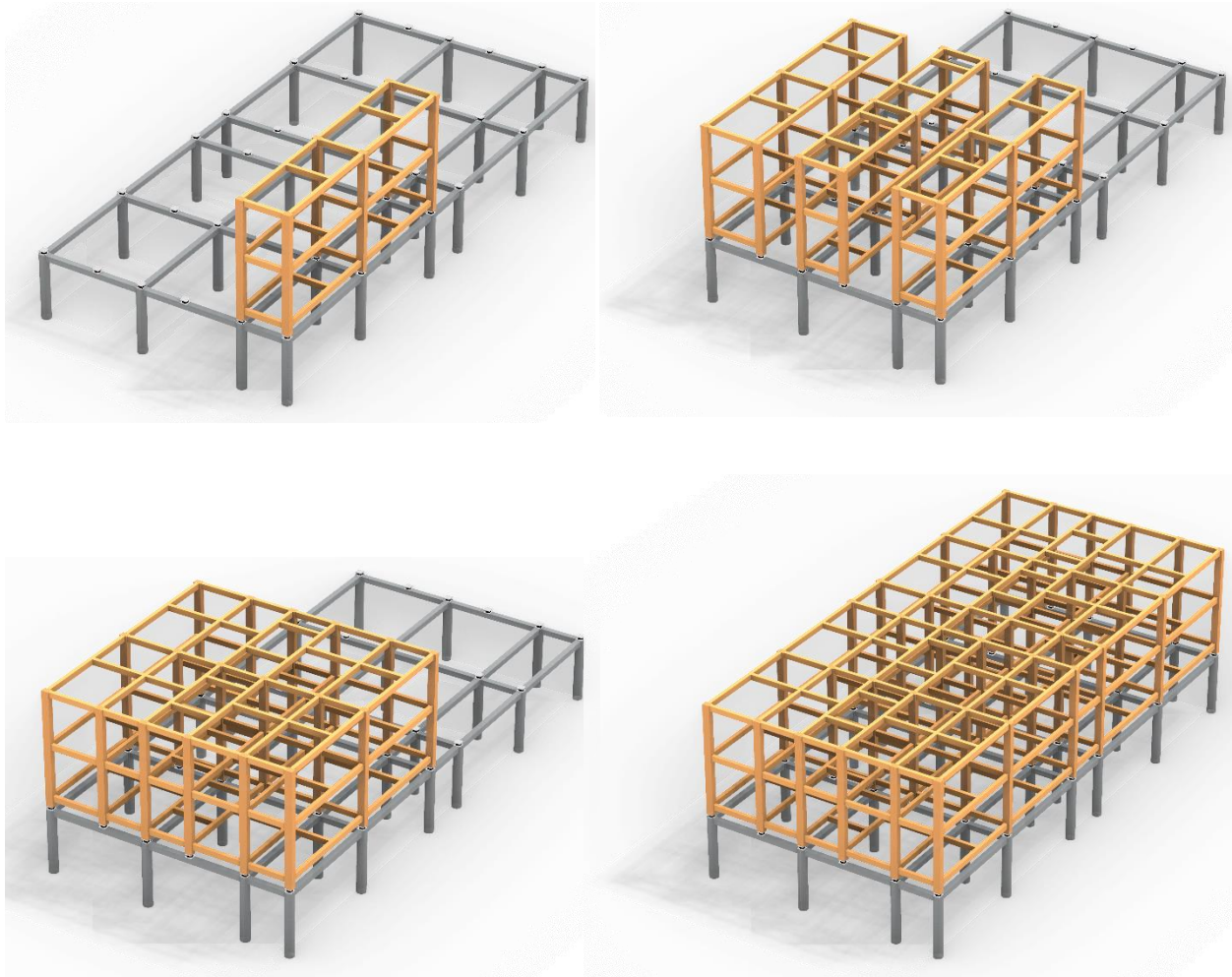


Ilustración 134. Proceso de armado Edificio Metamorfosis pasos 6 y 7. Elaboración Propia.

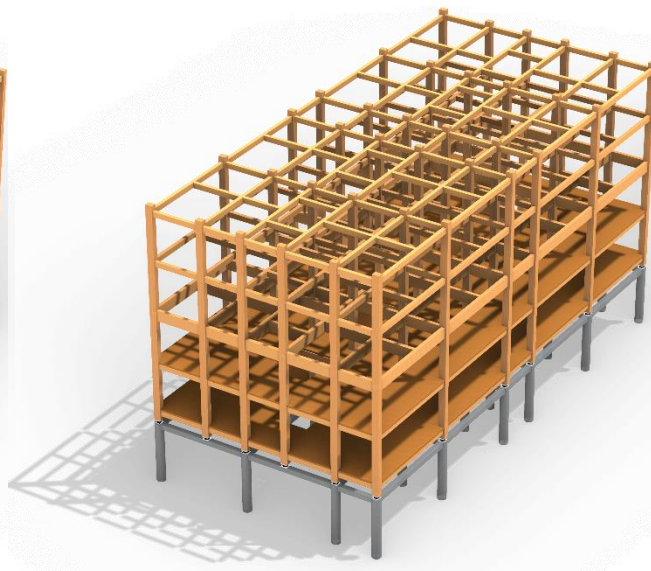
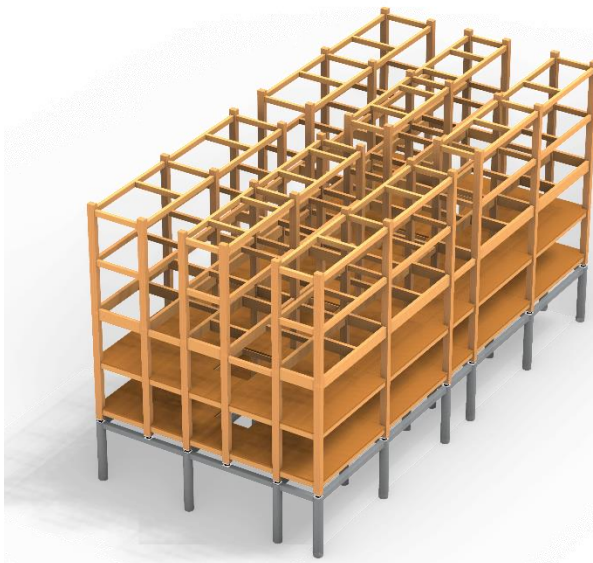
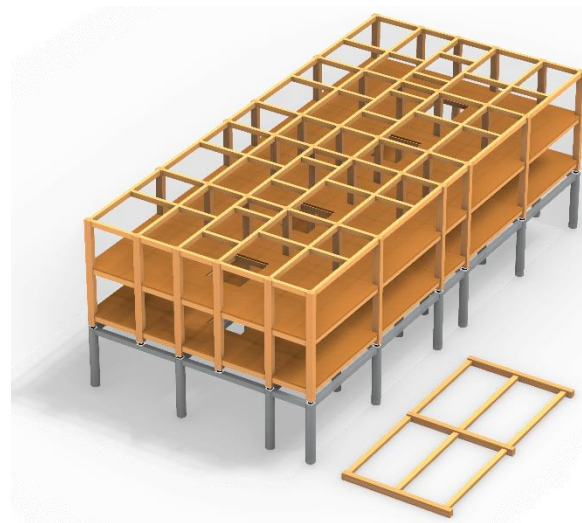


Ilustración 135. Proceso de armado Edificio Metamorfosis pasos 8 y 9. Elaboración propia.

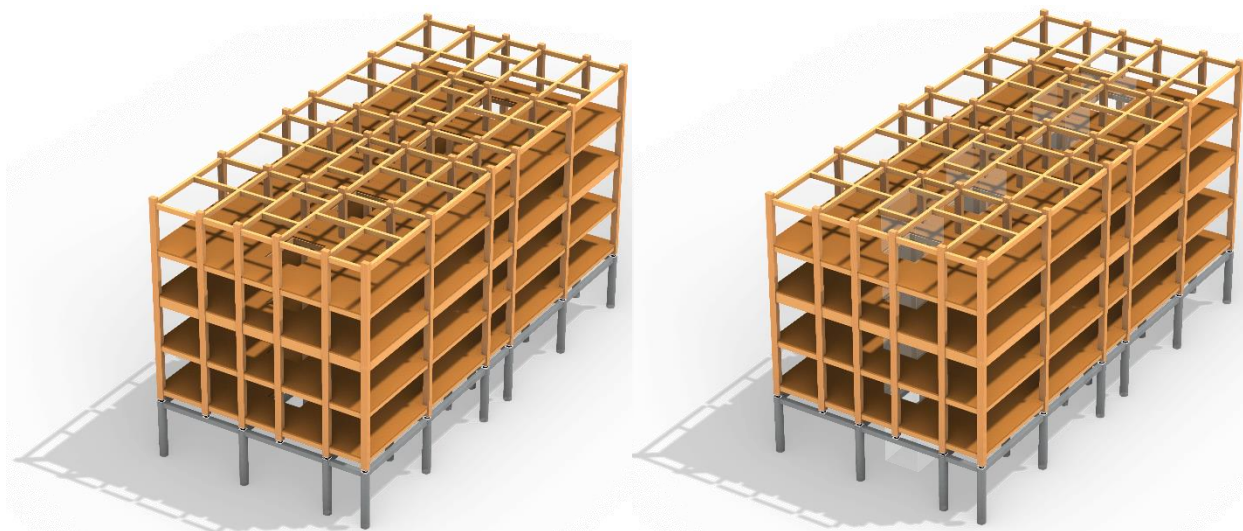


Ilustración 136. Proceso de armado Edificio Metamorfosis pasos 10 y 11. Elaboración Propia.

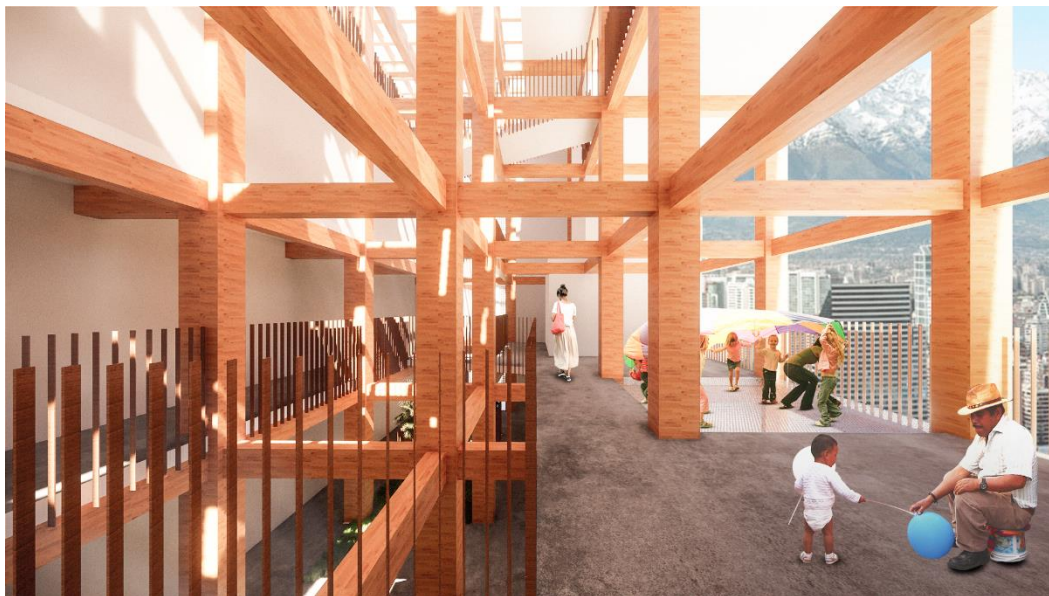


Ilustración 137. Visulaización interior Edificio Metamorfosis. Elaboración Taller Fenix 2.0

7

PROTOTIPO CASA METAMORFOSIS CHILE: CASO DE ESTUDIO Y VALIDACIÓN

7.1 Prototipos de ensayo y proceso de diseño

7.2 Prototipo Chile Final.

Capítulo 7

7. Prototipo Casa Metamorfosis Chile: Caso de Estudio y Validación.

Bajo los requerimientos del concurso Solar Decathlon 2020, se deben construir dos prototipos reales a escala 1:1. El primero correspondiente al prototipo de Chile, que considera uno de los departamentos de la tipología dúplex del conjunto en los últimos dos niveles del Edificio Metamorfosis, y el prototipo de USA que corresponde a la exhibición directa del concurso a presentar en Washington DC, la cual considera medidas establecidas correspondientes a los requerimientos propios del concurso, y a los que se debe adecuar la tipología del departamento a presentar en Chile.

Para ambos prototipos se deben cumplir pasos tanto de diseño, como administrativos, los cuales responden a los requerimientos del concurso, basándose en los requerimientos propuestos por el Team PanAm. Para estos procesos de diseño se establece la misma metodología utilizada para los procesos del Edificio Metamorfosis, sin embargo, se debió agregar requerimientos propios de las circunstancias del proceso, incluyendo costos monetarios, plazos, mano de obra, entre otros.

Para el caso del prototipo Chile, el proceso de diseño estructural es parte de esta investigación, por lo cual se establecieron más de un diseño en todos los meses de desarrollo, adecuándolo constantemente a las condiciones propias del proceso, como a las condiciones administrativas. Por otra parte, el desarrollo de las variadas partidas faltantes, fueron desarrolladas con el taller Fenix 2.0, donde se realizaron múltiples pasos de diseño y resolución de las distintas áreas a desarrollar.

Finalmente, en el caso del prototipo USA, se realizará un trabajo colaborativo con la Universidad de Missouri S&T, los cuales se encargarán de llevar a cabo la construcción del prototipo propuesto por el Team, considerando las mismas características del sistema constructivo propuesto, adecuándose a las dimensiones establecida para la exhibición.

7.1 Prototipos de ensayo y procesos de diseño

En el comienzo del diseño del prototipo Chile, se establece determinar una sección del Edificio Metamorfosis, la cual correspondería al diseño previo de las viviendas transversales al edificio, un departamento de 1 nivel con cara norte y sur, utilizando la crujía del ancho total del edificio de 14.7 m. Este diseño de la arquitectura, fue desarrollado por el Team Chile antes de definir la arquitectura final del edificio, por lo tanto, corresponde a una arquitectura obsoleta actualmente.

El proceso de este primer prototipo Chile, se desarrolla con el motivo de evaluar la primera cubicación estimada de costos y productos a utilizar, de tal manera de cumplir con los procesos de desarrollo logístico en las solicitudes de gastos económicos y de auspicio. Para esto, se establece un diseño arquitectónico simple que responde al mismo diseño estructural del Edificio Metamorfosis, estableciendo puntos focales de diseño como los vacíos vidriados y muros transformables de exhibición. Además, se establece una estructura secundaria de muros, pisos y techos que sostendrán el resto de los materiales y con el objetivo de establecer un diseño sustentable y eficiente térmicamente.

En consiguiente, se establece la selección de la sección a definir y se establece el proceso de diseño.

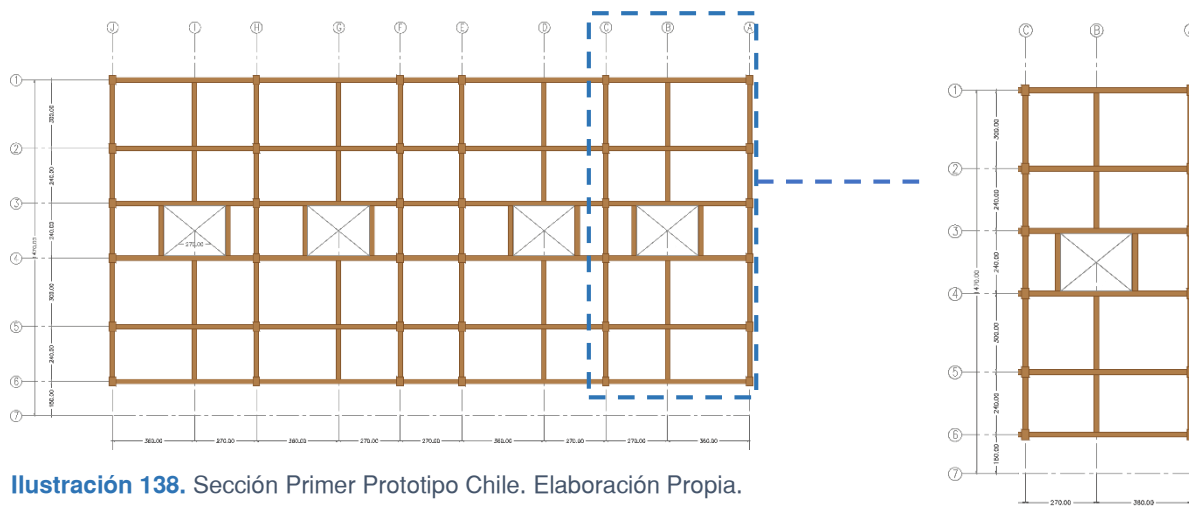


Ilustración 138. Sección Primer Prototipo Chile. Elaboración Propia.

7.1.1 Primer Prototipo Chile:

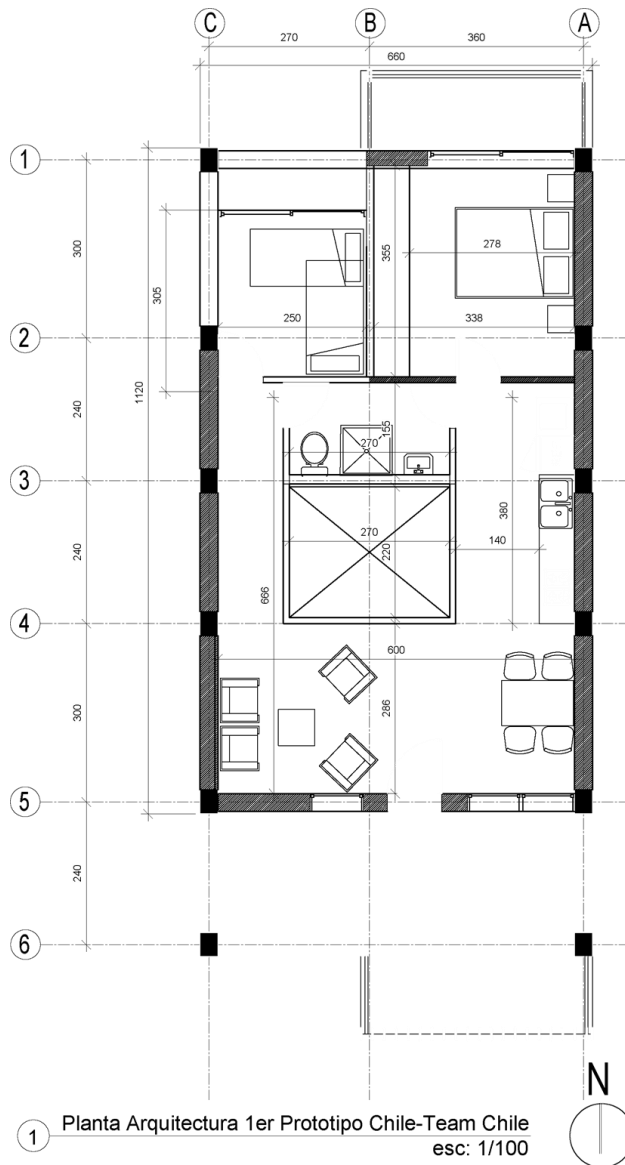


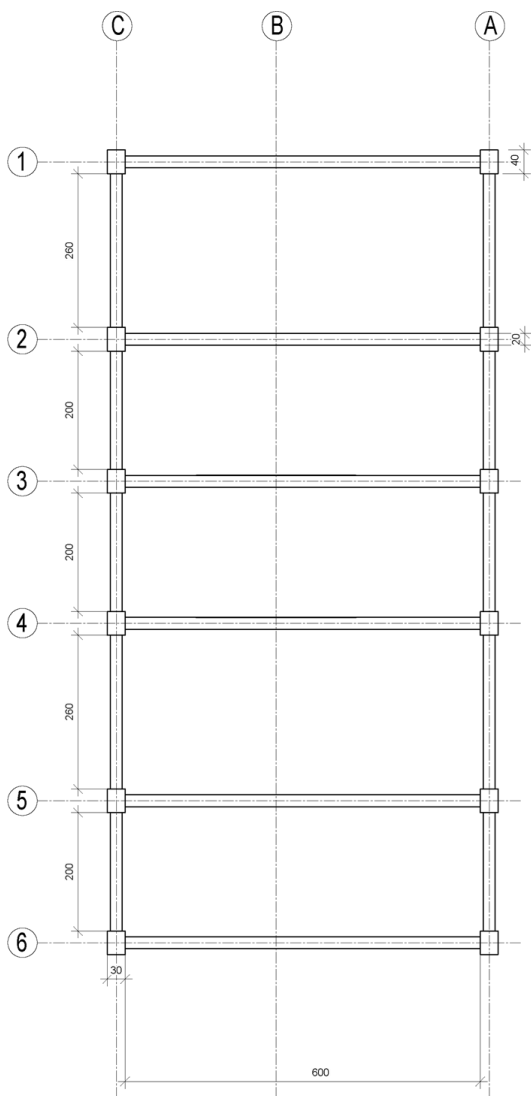
Ilustración 139. Planta de Arquitectura primer prototipo chile. Elaboración Propia.

El diseño se comienza desde la planimetría de arquitectura, la cual proviene del Edificio Metamorfosis, respondiendo directamente a la estructura propuesta para éste.

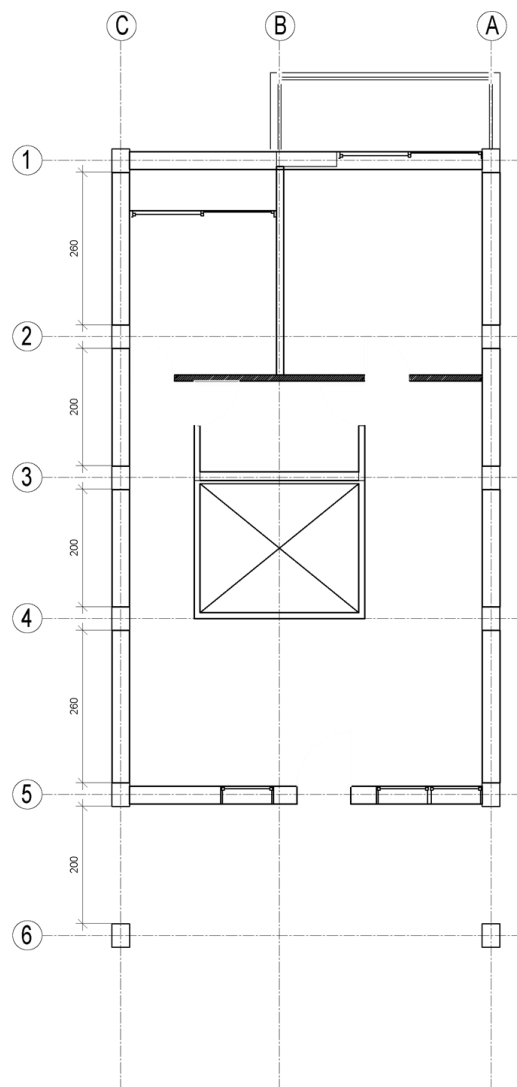
El diseño propuesto plantea un departamento de 2 habitaciones y 1 baño, además de los espacios comunes de living, comedor y cocina. Por considerar el vacío continuo diseñado para el conjunto, se aprovecha dentro del espacio interior como centro lumínico y de ventilación natural tanto para el baño como la cocina. Además, plantea una terraza en voladizo para el dormitorio principal y un espacio de futura expansión en la entrada principal. El departamento tiene 73.92 m².

El concepto abierto propuesto, relaciona directamente los espacios comunes y ejes de circulación en relación al centro vacío, de tal manera que los espacios cobren mayor sensación de apertura y aprovechamiento de la luz natural.

Posteriormente se trabaja en la estructura tanto primaria como secundaria y visualizaciones.



② Planta Estructural 1er Prototipo Chile-Team Chile
esc: 1/100



③ Planta Estructura Secundaria 1er Prototipo
Chile-Team Chile
esc: 1/100



Ilustración 140. Planos Estructuras primaria y secundaria primer prototipo chile. Elaboración Propia.

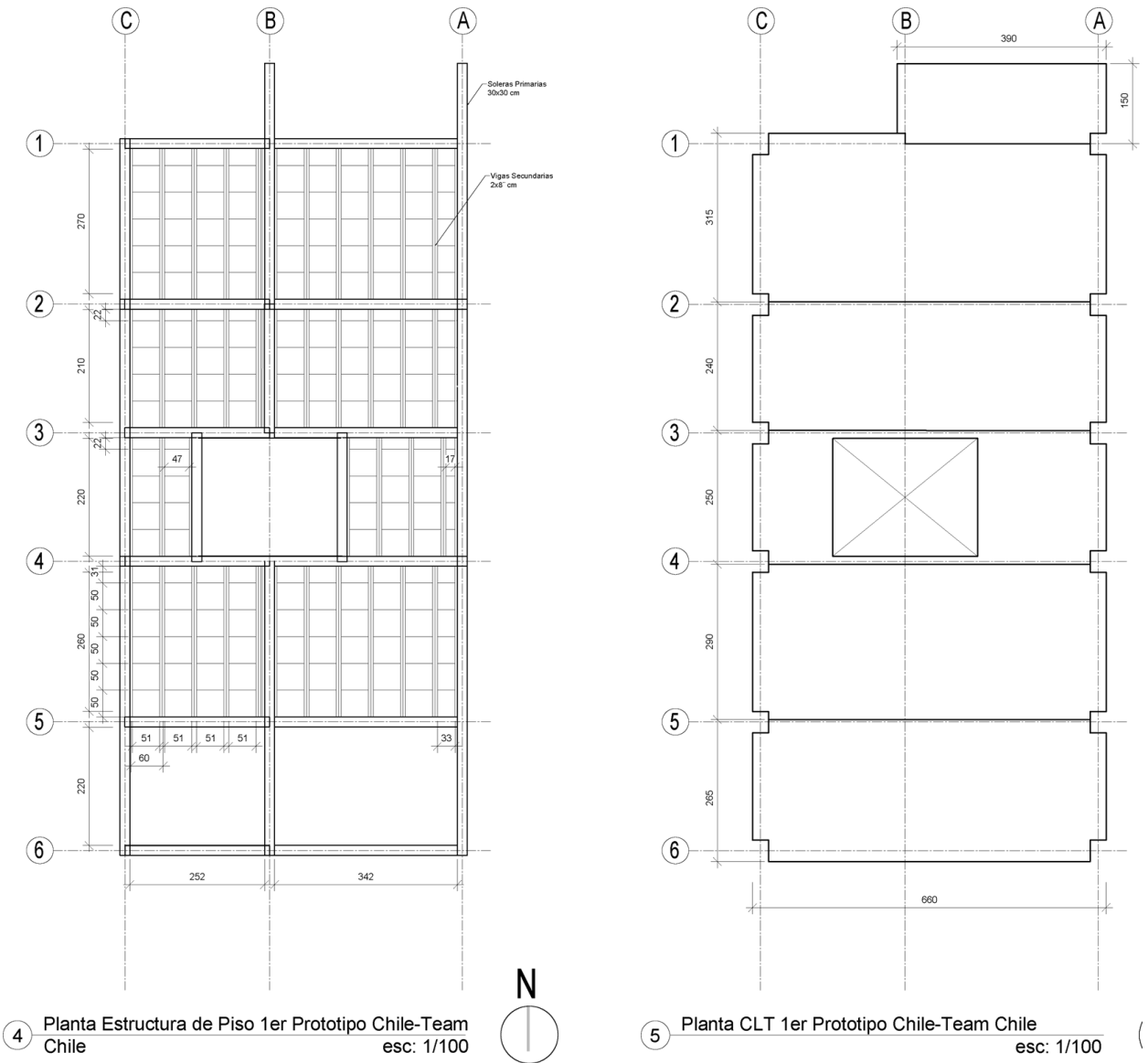
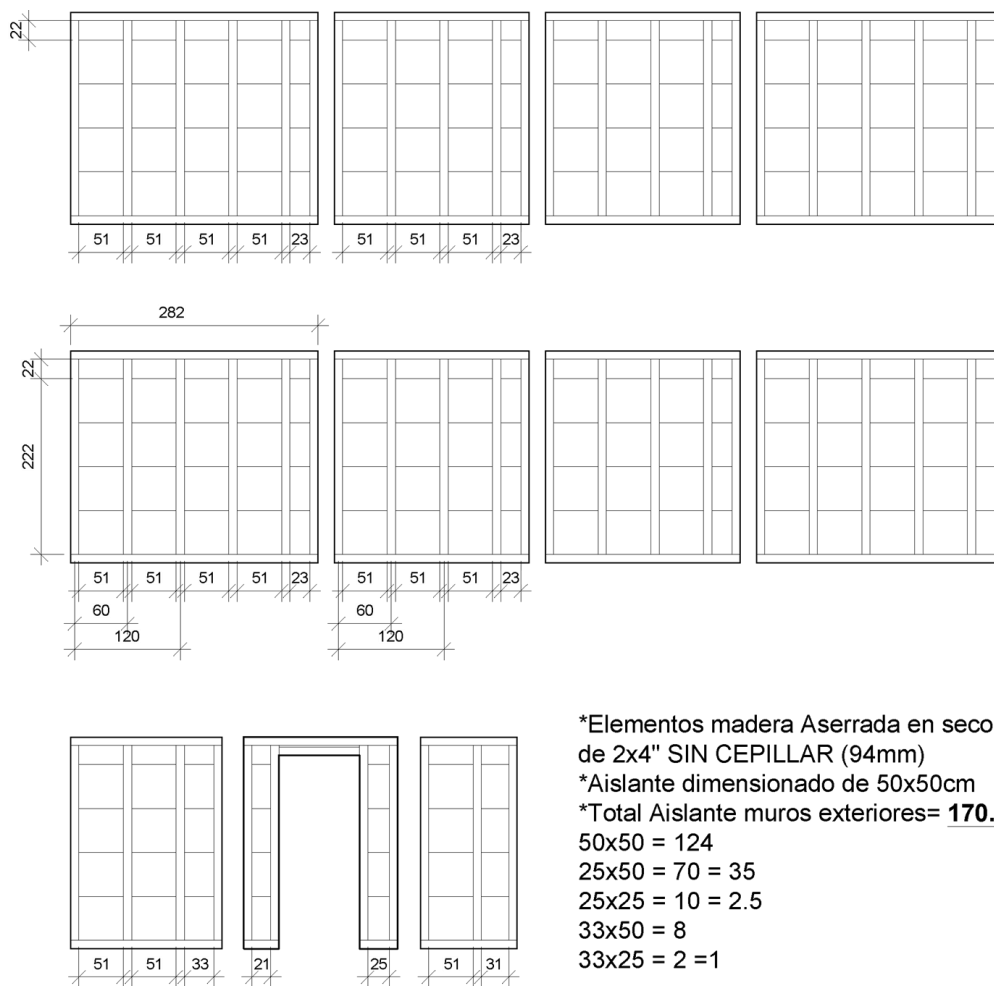


Ilustración 141. Planos estructura de piso/techo y planchas de CLT, primer prototipo chile. Elaboración Propia.



Esta estructura corresponde a Pilares de 40x30 cm y Vigas de 30x20 cm, ambas de madera laminada estructural. Además, se consideran planchas pre-dimensionadas de CLT como parte de la estructura primaria.

Finalmente se considera la estructura secundaria como madera aserrada en seco, para techos, piso y muros, complementadas con aislante orgánico y planchas de yeso/cartón y vulcanita.

6

Cubicación Muros 1er Prototipo Chile-Team Chile

esc: 1/100

Ilustración 142. Cubicación muros para cantidad de madera aserrada, aislantes y planchas, primer prototipo Chile . Elaboración Propia.

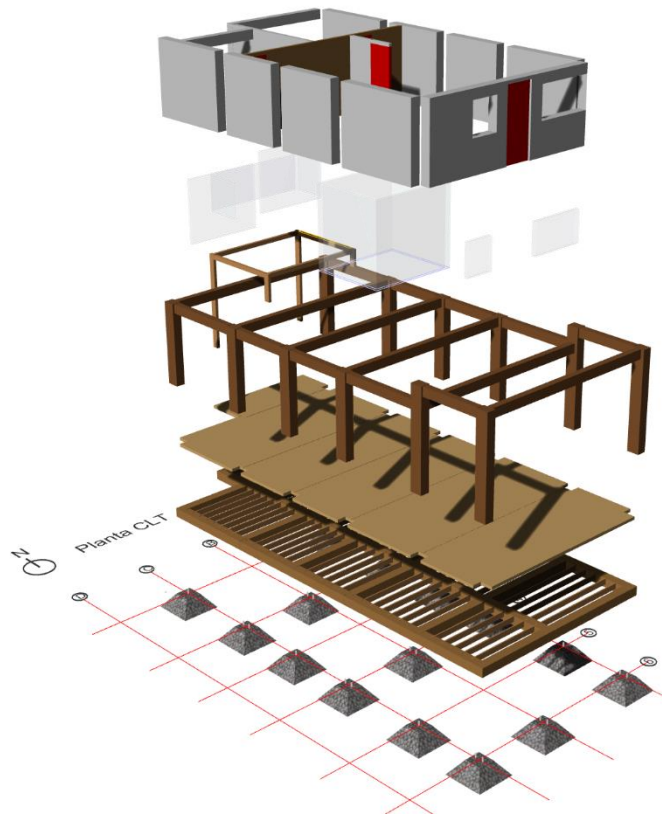


Ilustración 144. Primera explotada del prototipo chile. Inicio estructura y definición de alturas y dimensiones. Elaboración propia.

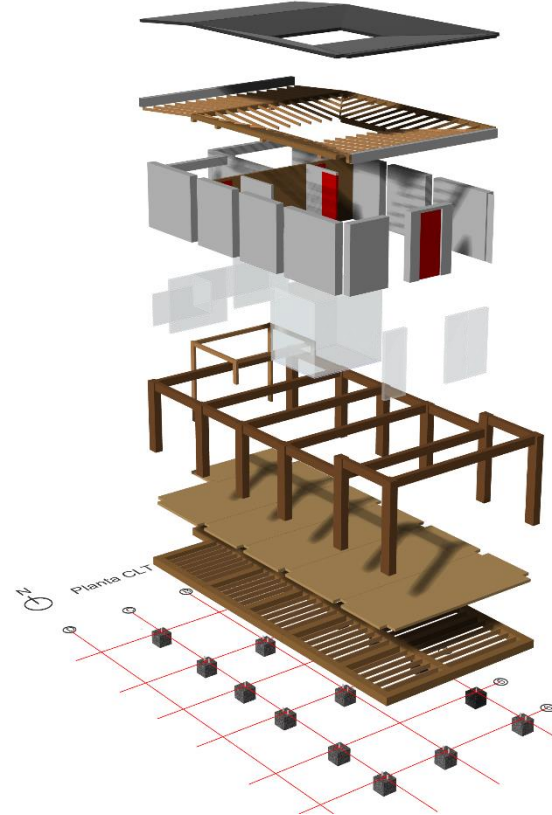


Ilustración 143. Modificación de fundaciones, vanos y creación techumbre prototipo chile. Elaboración propia.

Las mayores modificaciones de la primera etapa de diseño corresponden a redimensionar los muros interiores para ser ajustados a espesores más pequeños y cambiar el diseño de los vanos. Además, se realizan pequeñas modificaciones a la planimetría general de arquitectura, y se confecciona la estructura de techumbre y posibles coberturas.

La utilización de la estructura proveniente del diseño del Edificio Metamorfosis produce que, al ser utilizado en una vivienda de 1 nivel, sin mayor carga estructural, las dimensiones de los elementos de madera, quedan sobredimensionados y se modifican posteriormente. Además, se rediseña la techumbre y se realizan las terminaciones interiores del prototipo. Por último, se agrega al diseño de uniones y detalles técnicos los materiales provenientes de los auspiciadores o sponsors.

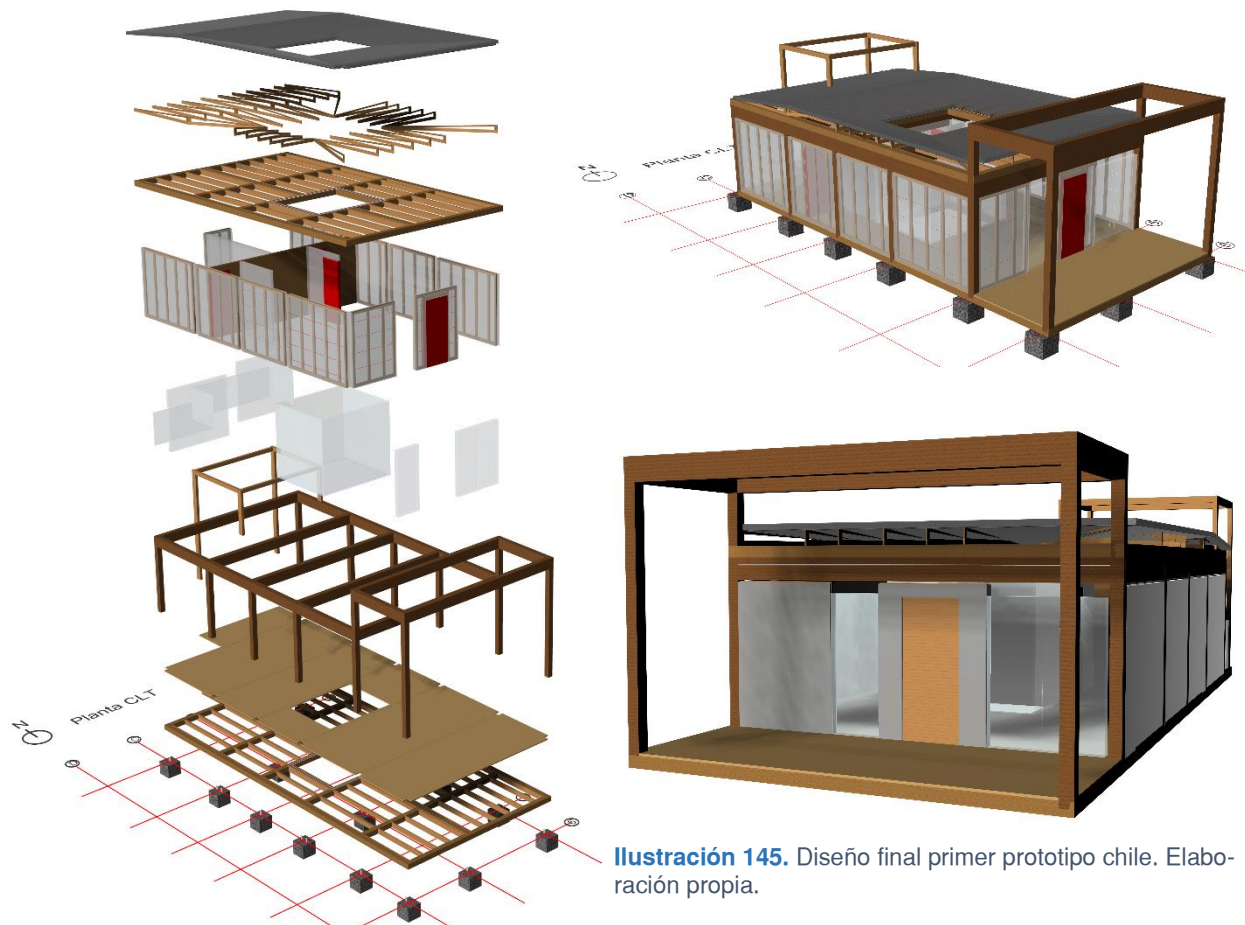


Ilustración 145. Diseño final primer prototipo chile. Elaboración propia.

7.1.2 Proceso de rediseño Prototipo Chile:

Al finalizar el proceso de solicitud de auspicio, se definió de mejor manera los recursos que se contabilizaban para la construcción del prototipo Chile y el prototipo USA. Es por esto, que hubo que rediseñar los prototipos y definir de manera global el diseño de departamentos, tipologías y principalmente la metamorfosis que se plantea como concepto de diseño. De esta manera, a través del taller Fenix 2.0 se realiza primero un desarrollo del Edificio Metamorfosis y las distintas posibilidades de conceptos y diseño arquitectónico.

Posteriormente, una vez finalizado el proceso de diseño global y determinación de las tipologías finales de departamentos que se trabajarán, se abre el proceso de selección de uno o más departamentos por grupo para obtener un catálogo de diseño de prototipo que se ajustará a la estructura definida en esta investigación anteriormente planteada. Cabe destacar, que el prototipo se acota a la estructura de madera, ya que ese es el desafío planteado en el sistema constructivo.

En este proceso de exploración arquitectónica de las distintas tipologías de posibles departamentos, es que se comienza a realizar interferencias y coordinaciones con la estructura propuesta, ya que, si bien está diseñada para brindar una mayor libertad de transformación arquitectónica, la estructura secundaria tiene ciertas restricciones para adecuarse. Es así como se corrige constantemente los distintos diseños para un mejor desarrollo final de las propuestas.

Finalmente, al obtener el catálogo final de las distintas tipologías de posibles prototipos, es que se escoge el que tenga mejor adaptabilidad a la nueva estructura planteada y plantee un mayor desarrollo arquitectónico y atractivo para el concurso. De esta manera, se desarrollan todas las áreas requeridas para la posterior construcción y se realiza un enfoque a los detalles técnicos que validarán el diseño del sistema estructural investigado.



Ilustración 146. Primeras propuestas de rediseño prototipo chile. Elaboración Taller Fenix 2.0

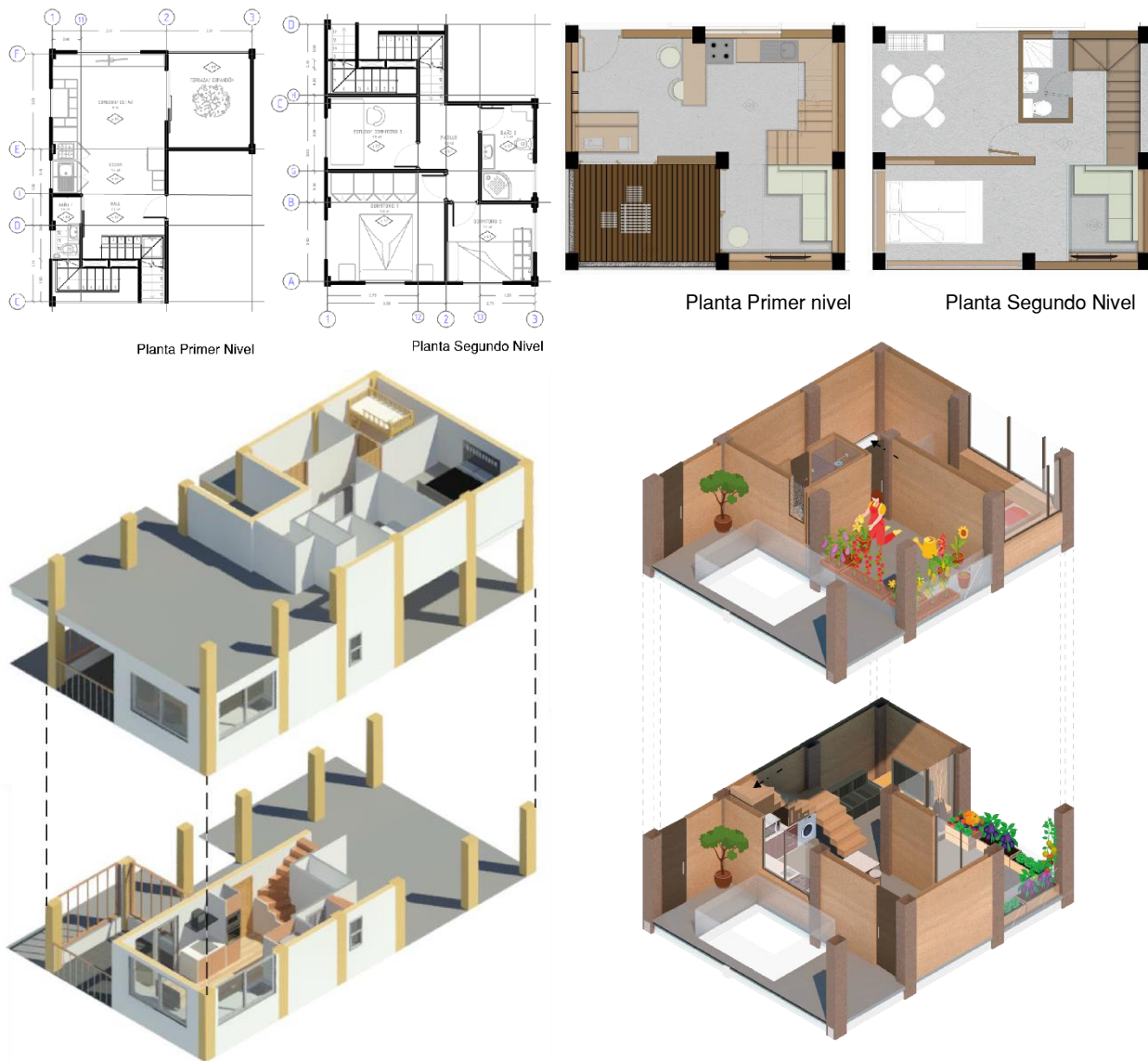


Ilustración 147. Segundas versiones de rediseño prototipo chile. Elaboración Taller Fenix 2.0.

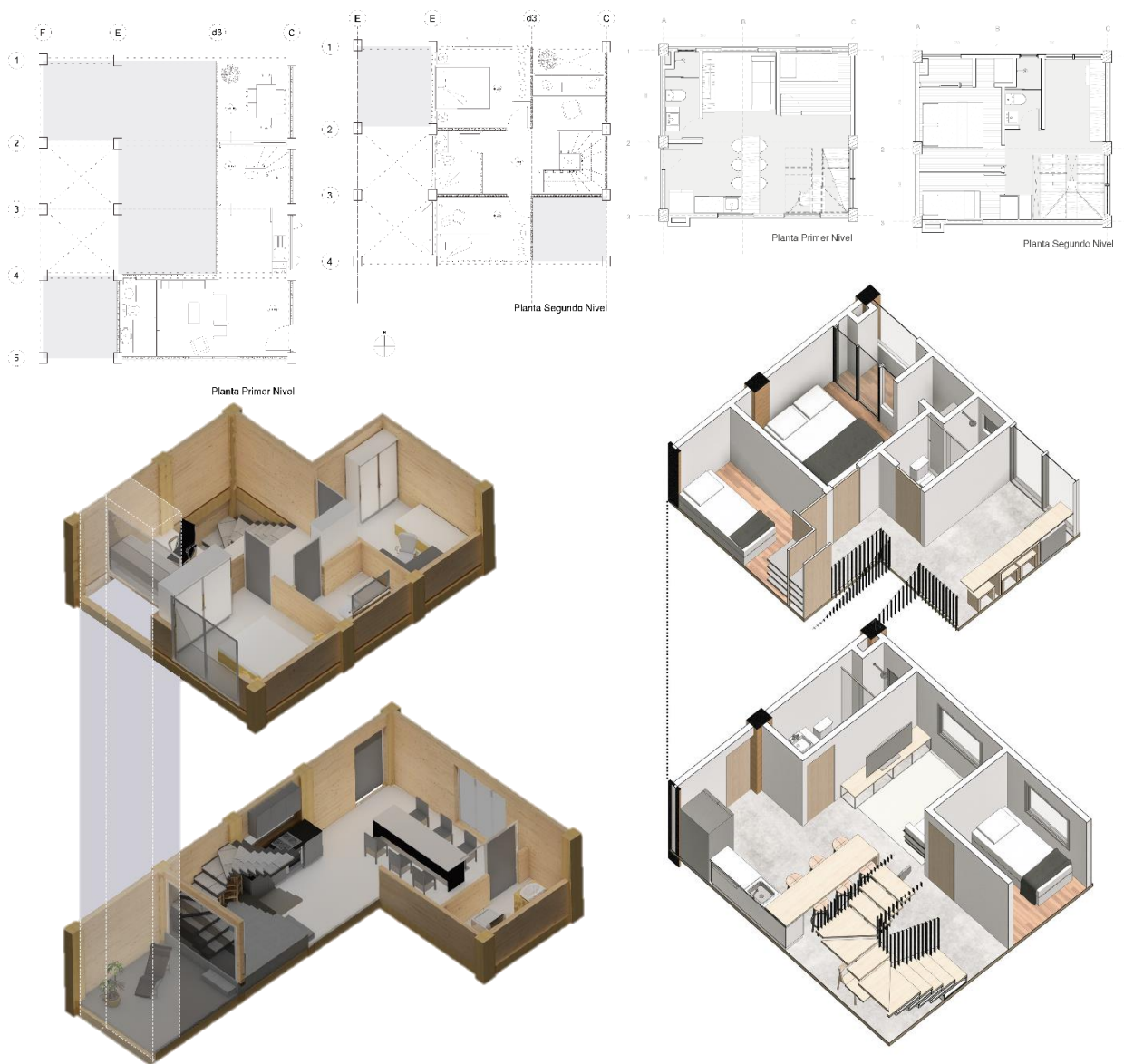


Ilustración 148. Últimas versiones de la primera etapa de rediseño de prototipo chile. Elaboración Taller Fenix 2.0

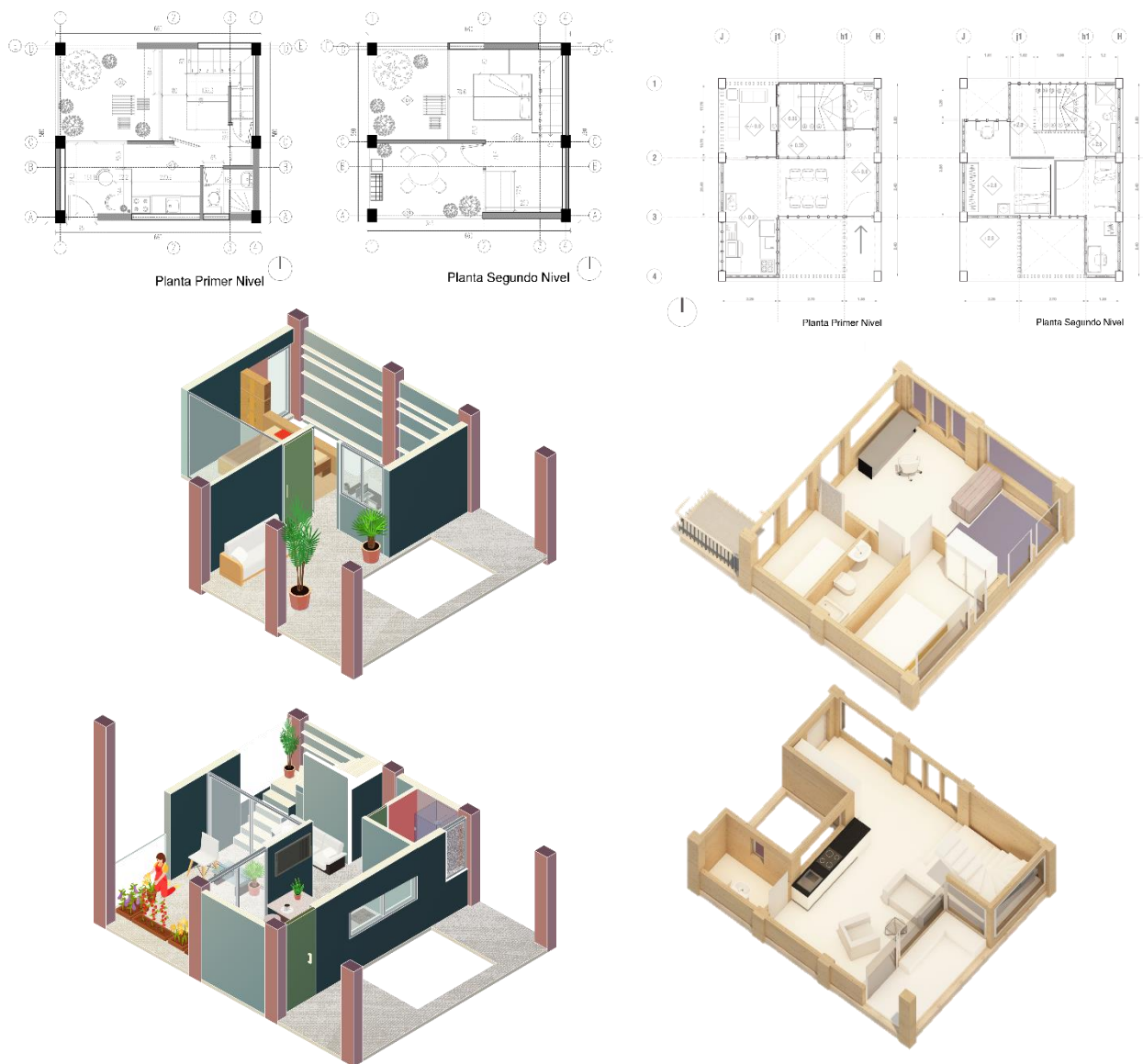


Ilustración 149. Segunda etapa de rediseño prototipo chile, con nuevas dimensiones de elementos estructurales y dimensiones definidas. Elaboración Taller Fenix 2.0

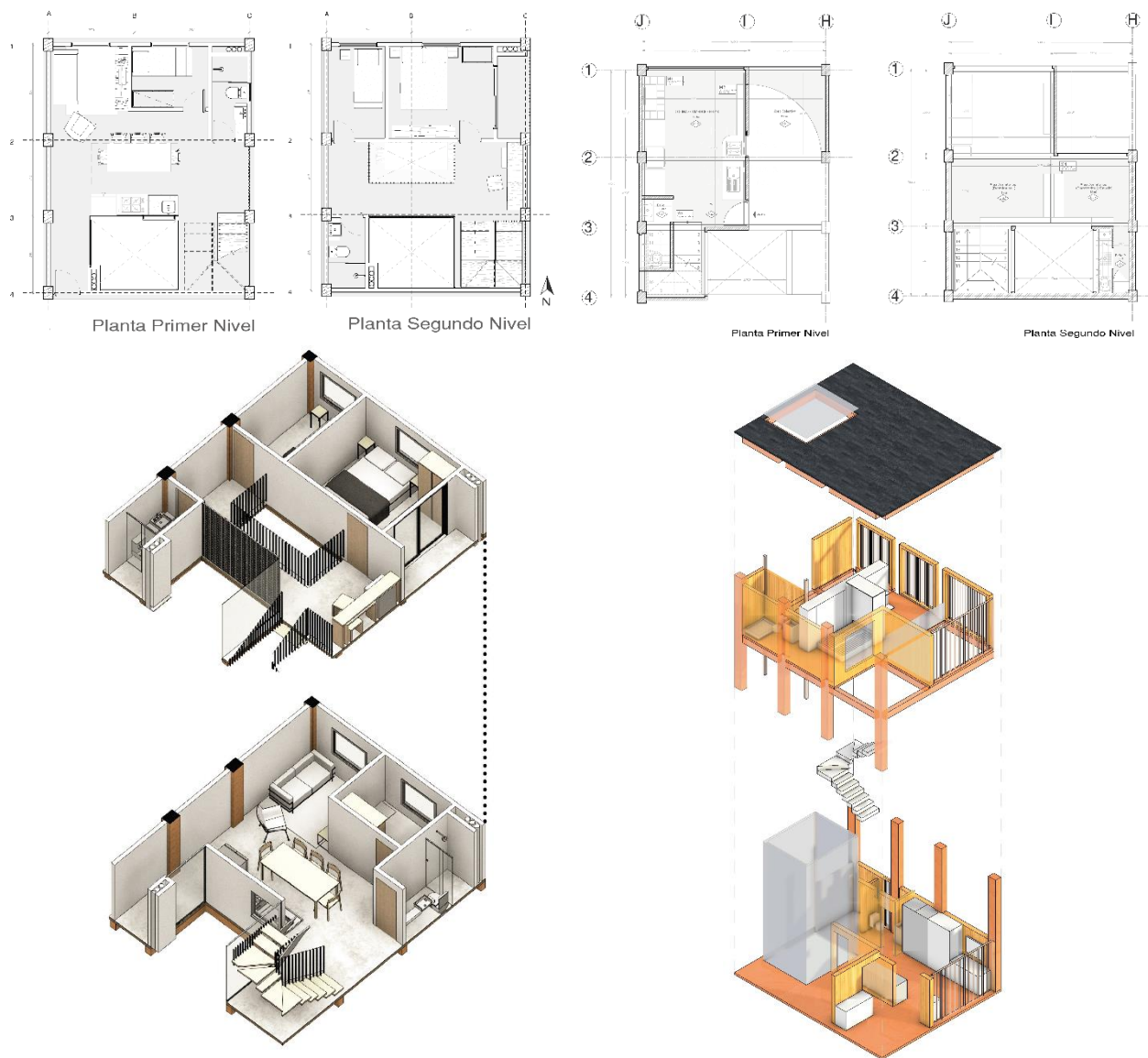


Ilustración 150. Segunda etapa de rediseño prototipo chile y elección del prototipo final. Elaboración Taller Fénix 2.0

Al escoger el diseño del prototipo Chile, se determinan los auspiciadores finales que aportarán de diferentes maneras al proyecto. Para esto, se realiza un catastro de todos los materiales necesarios y un nuevo procedimiento de cubicación y conjunto de planimetrías (Adjuntas en anexo 3), finalizando así en el proceso constructivo del prototipo Chile.

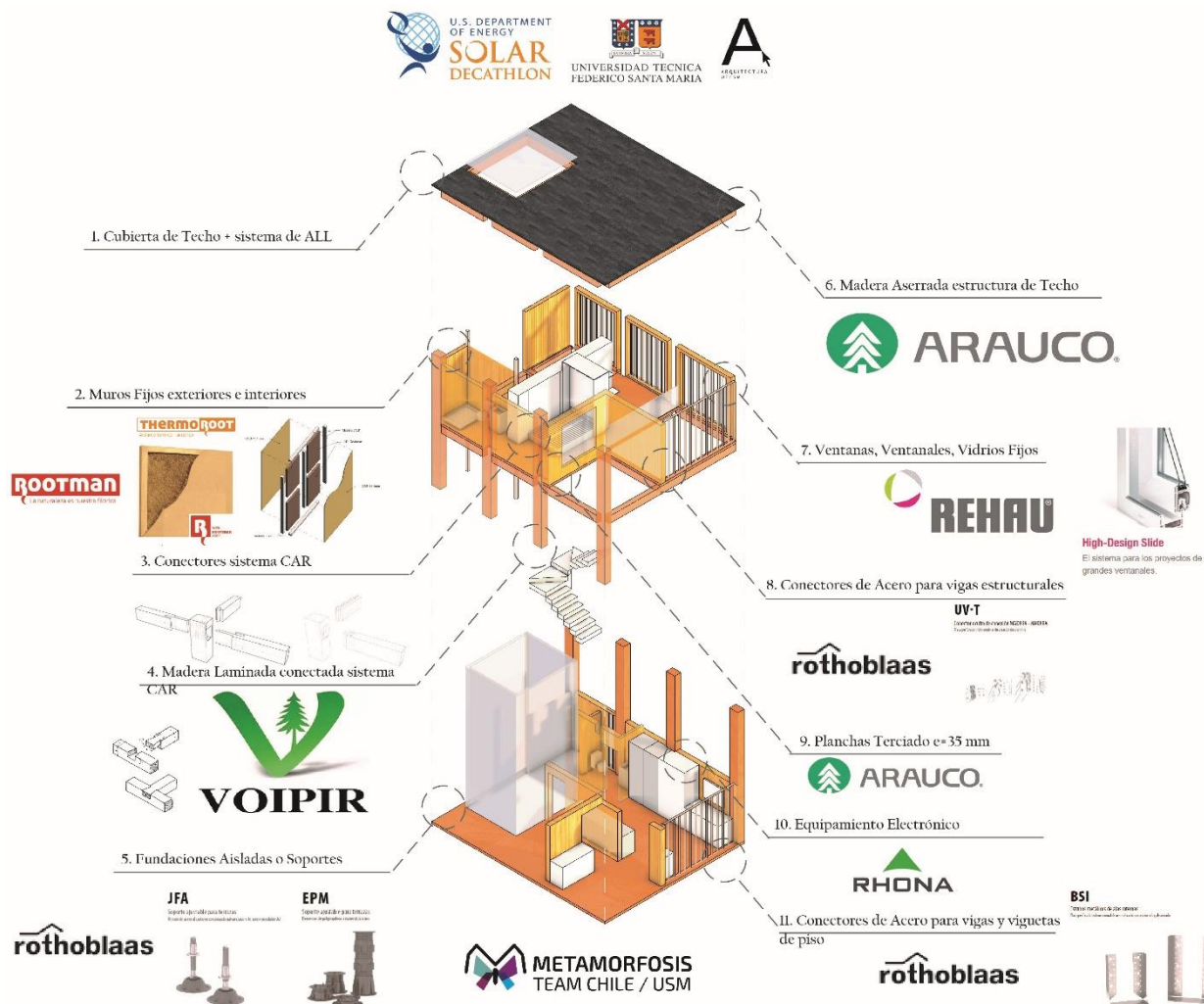


Ilustración 151. Lámina sponsors Prototipo Chile. Elaboración propia.

7.2 Prototipo Chile Final

Para la actual investigación solo se explicará con detalle la estructura definida para el prototipo Chile, determinando el diseño del sistema constructivo a validar y los detalles técnicos propios para éste. Además, se adjuntarán como anexos todos los planos asociados al desarrollo de todas las partidas y cubicaciones finales de los distintos elementos.

Para el desarrollo final de la estructura se modifican algunos ítems originales provenientes del diseño del Edificio Metamorfosis, como es el re-diseño del vano de luz para un mejor aprovechamiento del área útil, el cambio de dimensiones de los ejes 1-2 y 2-3, para un mejor ajuste de los espacios arquitectónicos e instalación de la estructura secundaria, y finalmente el re.-dimensionamiento de los elementos estructurales y direccionamiento de los pilares para un desarrollo estructural más eficiente.

Considerando lo anteriormente mencionado, se inicia con la planimetría de la estructura, determinando todos los cambios y realizando un re-ajuste al resto de las partidas. Para esto se define la planta estructural, elevaciones estructurales y detalles técnicos de fundaciones y conexiones de los elementos de madera laminada.

La madera laminada será proporcionada por la empresa Voipir, Villarrica, la cual es Pino Oregón de dimensiones: 185 x185 mm y 185 x 360 mm. El total de madera laminada utilizada para el proyecto es de 11.85 m³. Por otro lado, se definen las conexiones de las vigas, las cuales responden al diseño anteriormente resuelto en el Edificio Metamorfosis. Sin embargo, debido a las dimensiones del prototipo los ejes transversal y longitudinal se cambian, dejando las vigas transversales al prototipo como las de mayor longitud con uniones carpinteras o sistema CAR, y las vigas longitudinales al prototipo como las de menor longitud con conectores de acero.

Los conectores de acero a utilizar en el prototipo cambian, determinando ahora la utilización del conector ALUMIDI 120, de Rothoblaas y se agregaran tornillos de acero como pasadores al ensamble de espera con cajeado. Además, se agregan otros tornillos solicitados y conectores que se explicarán posteriormente.

Finalmente, se demostrará el proceso de diseño para el ensamble CAR, el cual considera la modelación y mecanización de la unión y el funcionamiento a escala 1:1.

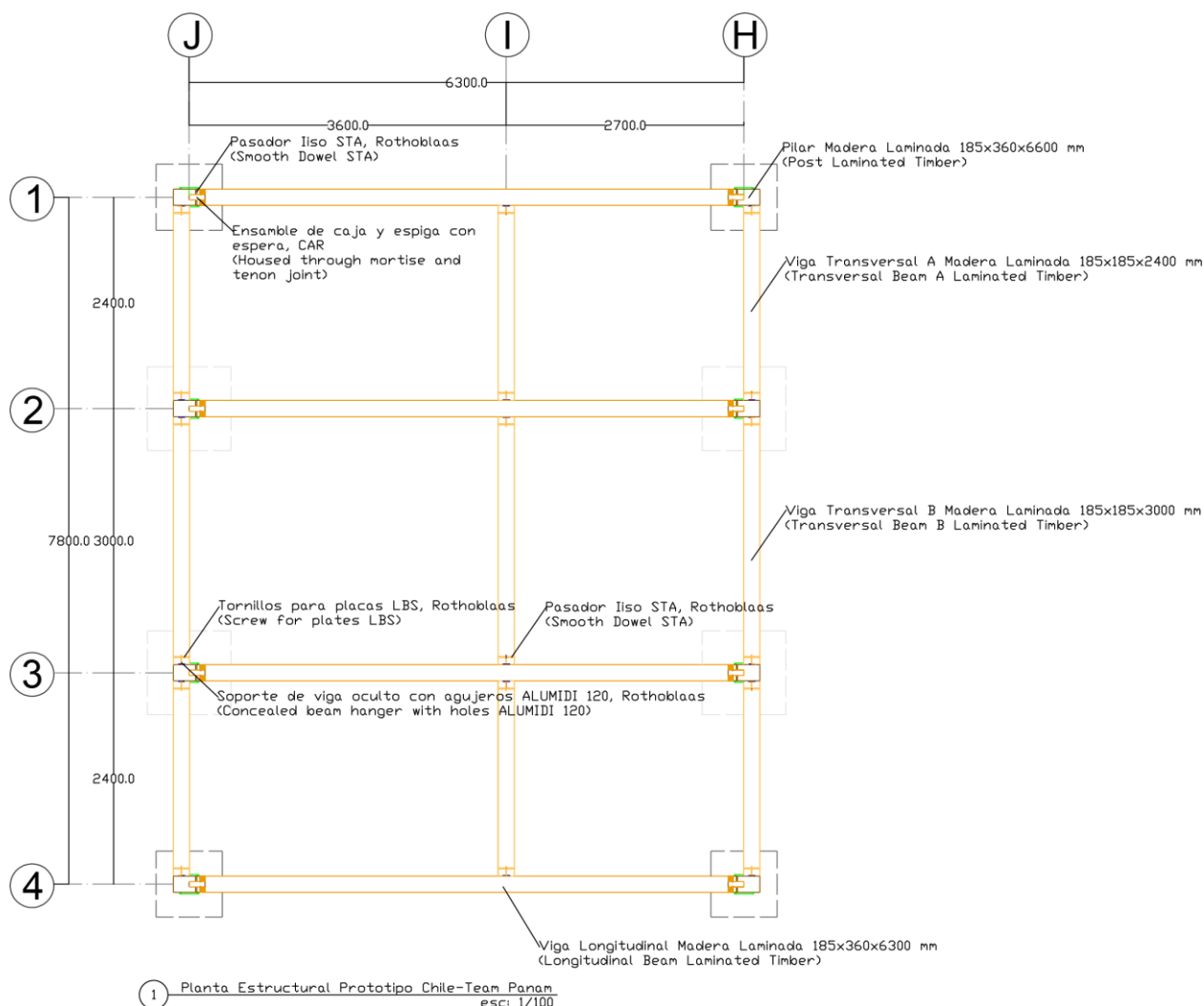


Ilustración 152. Planta estructural con detalle de ubicación de detalles técnicos. Elaboración propia.

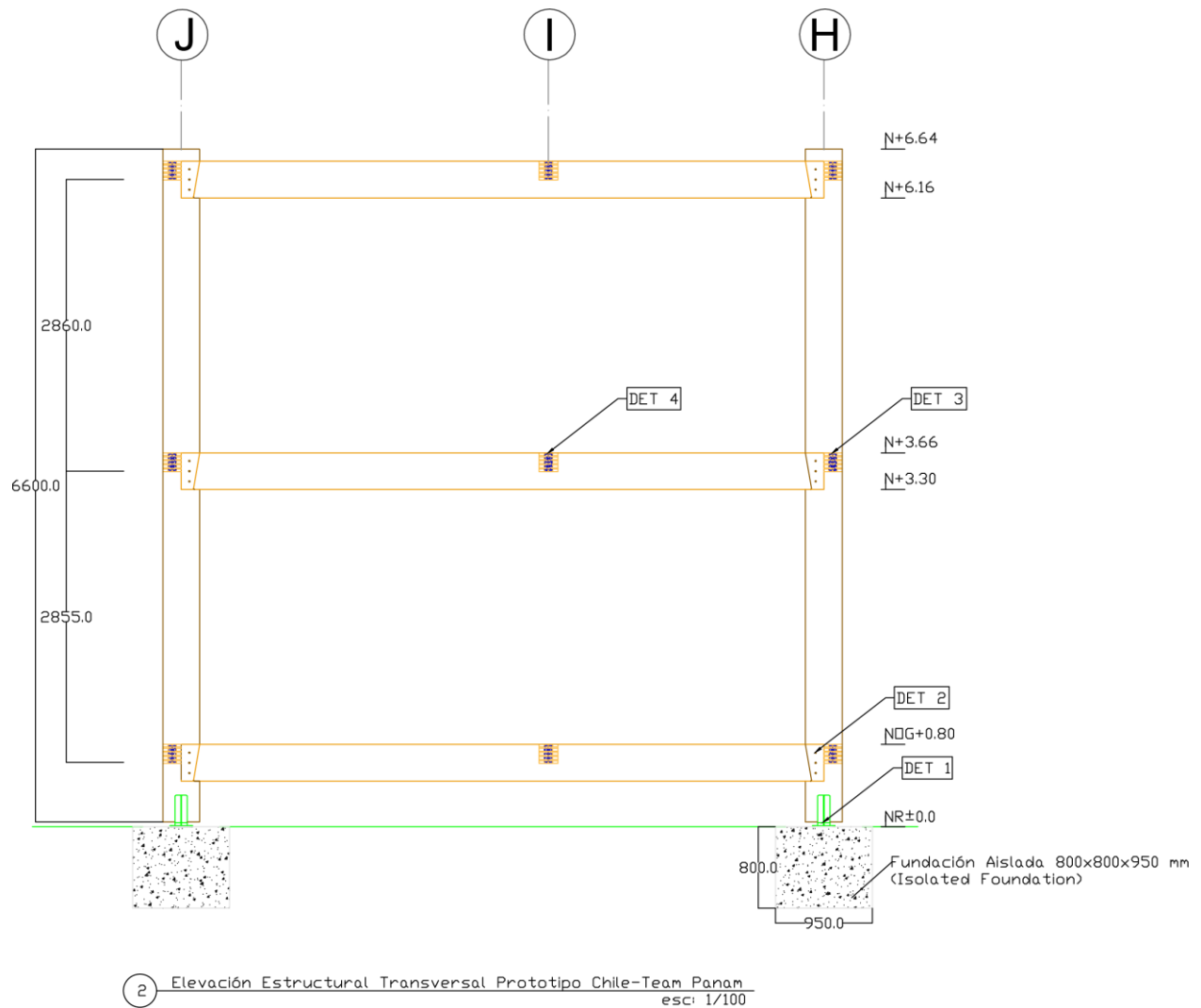
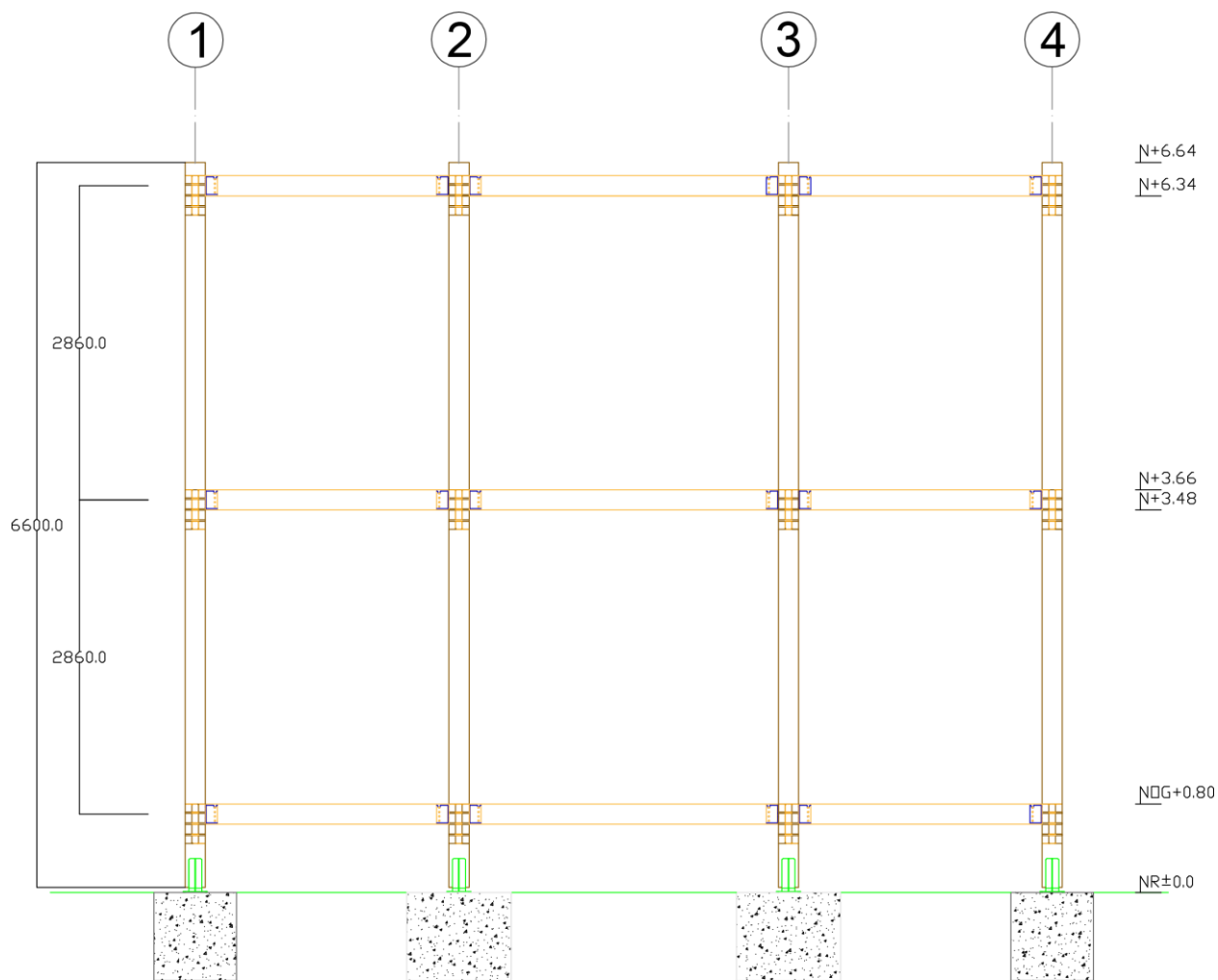


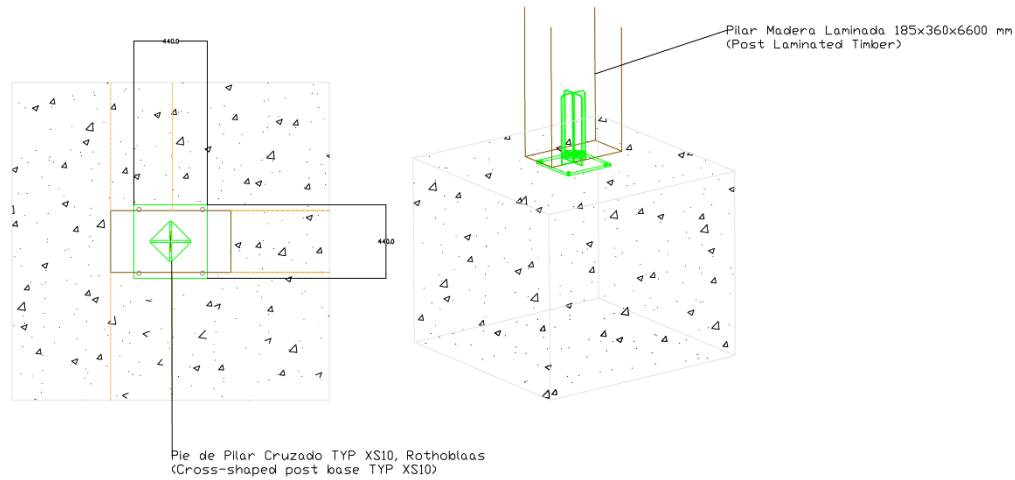
Ilustración 153. Elevación estructural transversal con ubicación de detalles técnicos. Elaboración propia.



3 Elevación Estructural Longitudinal Prototipo Chile-Team Panam
esc: 1/100

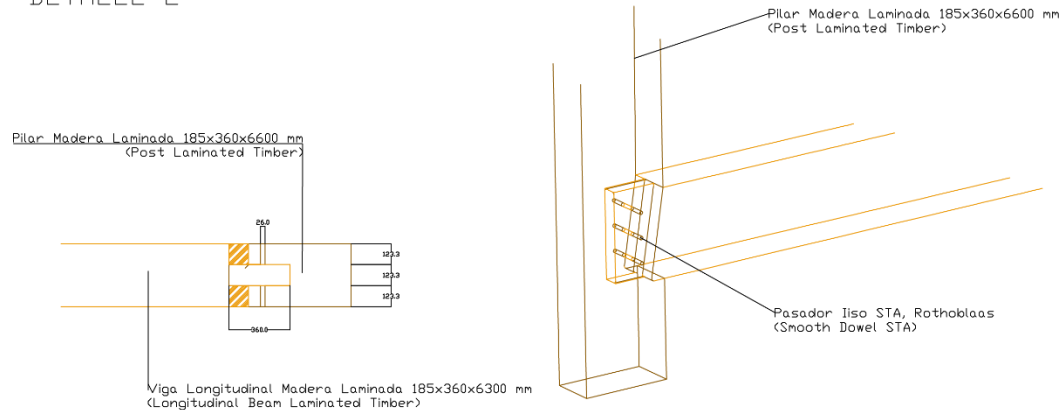
Ilustración 154. Elevación estructural longitudinal prototipo chile. Elaboración propia.

DETALLE 1



4 Detalle Conector fundación Prototipo Chile-Team Panam esc: 1/50

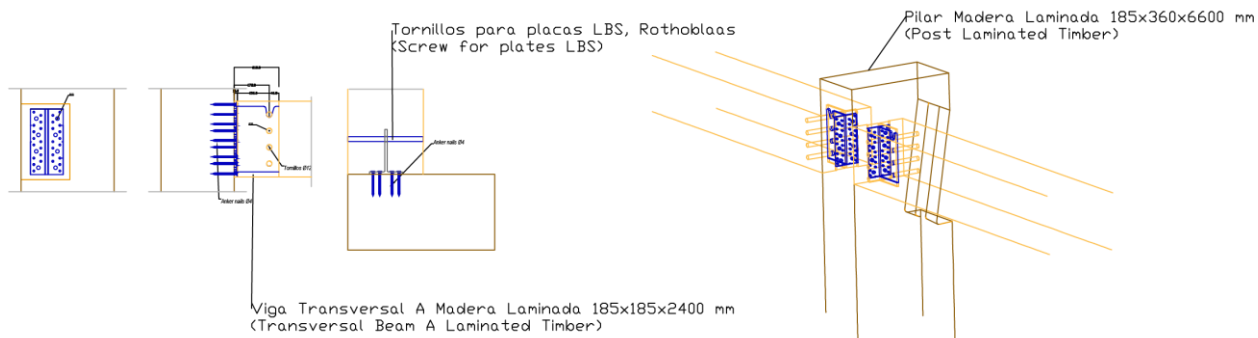
DETALLE 2



5 Detalle Unión CAR Viga Marco Prototipo Chile-Team Panam esc: 1/50

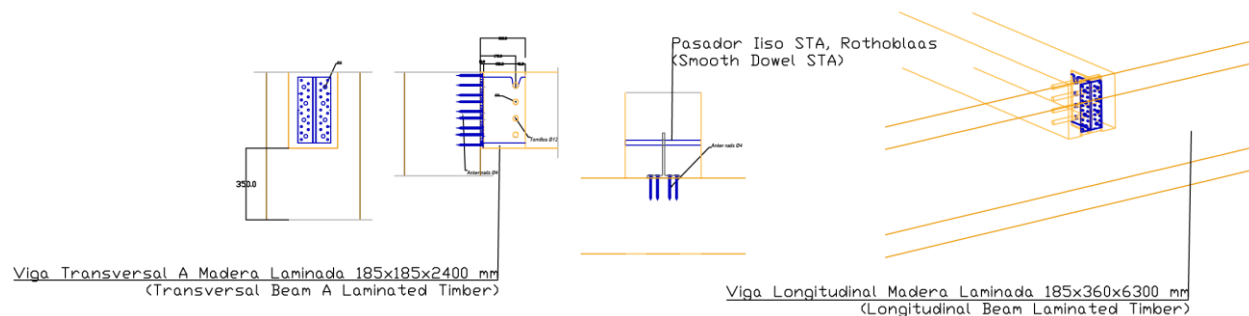
Ilustración 155. Detalles Técnicos inferiores prototipo Chile. Elaboración propia.

DETALLE 3



6 Detalle Unión Acero Vigas cortas Prototipo Chile-Team Panam esc: 1/50

DETALLE 4



7 Detalle Unión Viga-Viga Prototipo Chile-Team Panam esc: 1/50

Ilustración 156. Detalles de las dos ubicaciones de conector metálico ALUMIDI 120, Rothoblaas, prototipo Chile. Elaboración propia.

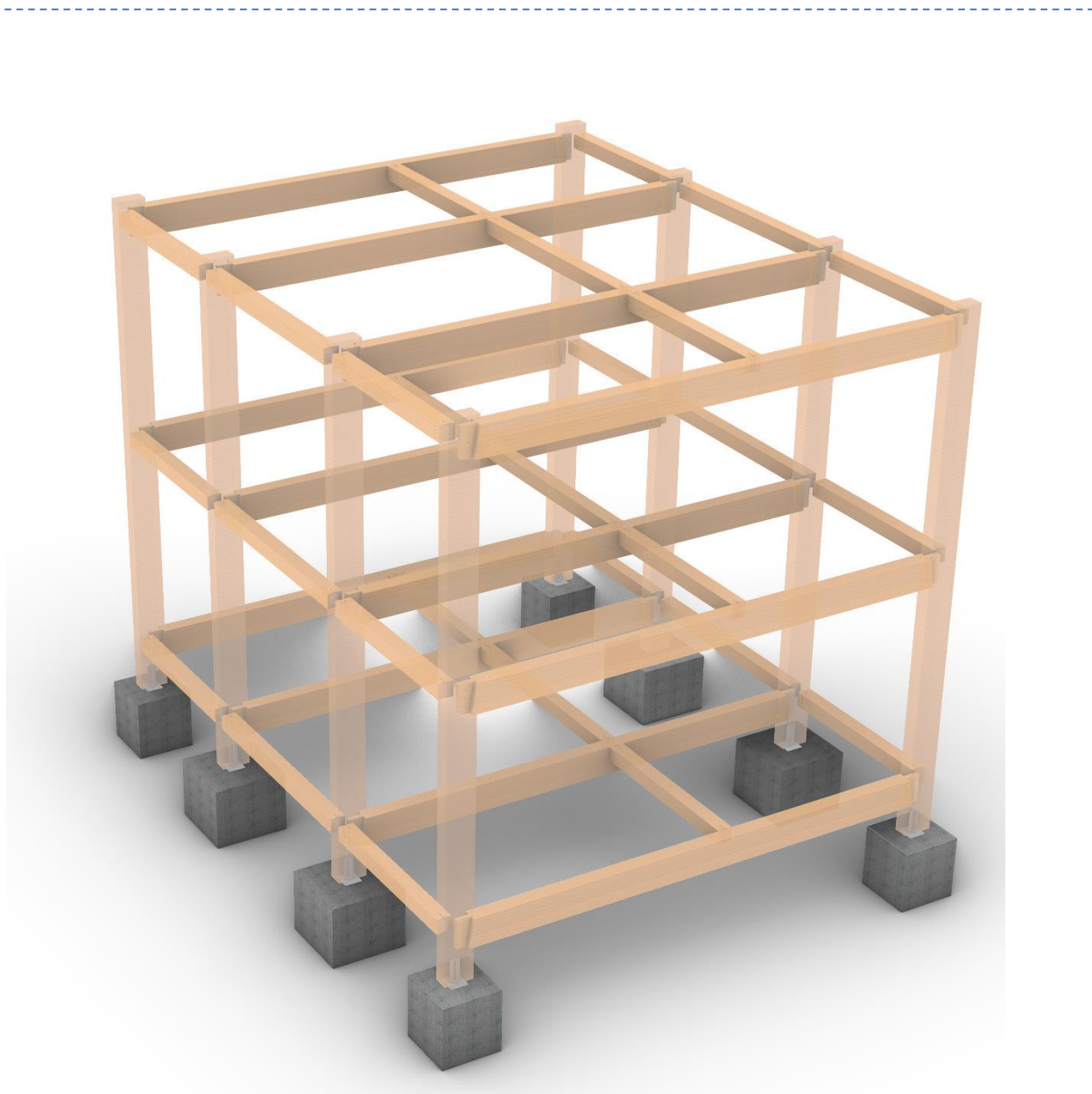


Ilustración 157. Perspectiva estructural prototipo chile. Elaboración propia.

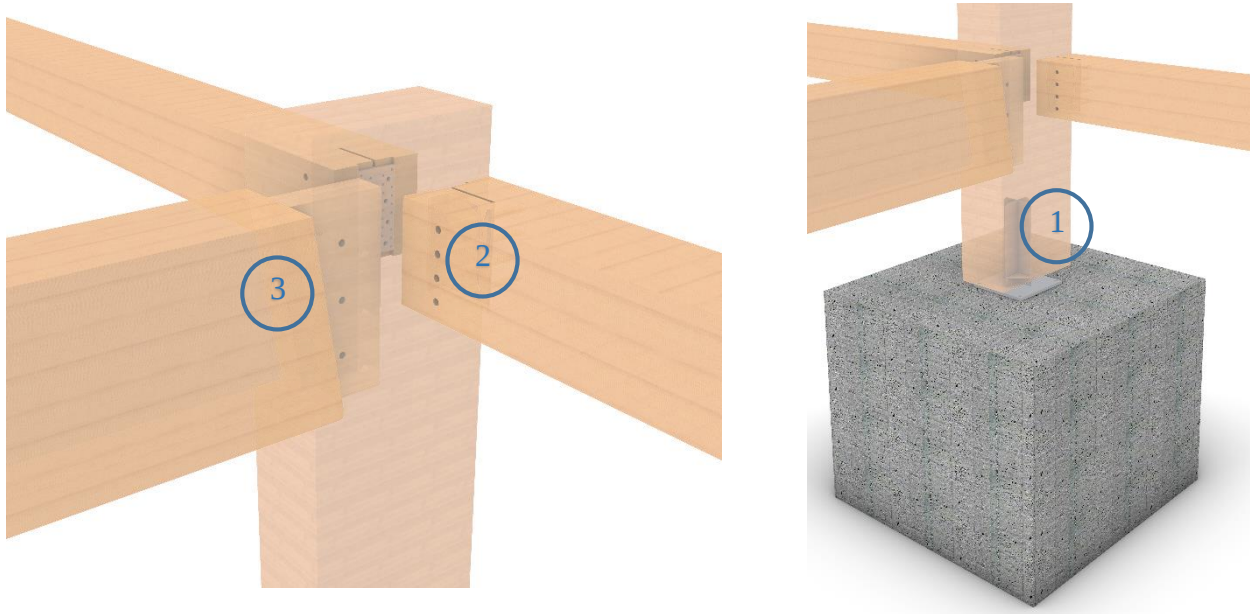


Ilustración 158. Visualizaciones conectores estructurales prototipo Chile. Elaboración propia

1 TYP XS10, Rothoblaas

Unión resistente al momento debido a la configuración cruzada y la disposición de las fijaciones. Su configuración está diseñada para asegurar una resistencia a momento de la unión, creando un vínculo estático semi-rígido en la base. Idóneo para usos de ambientes externos. Su diseño de cuchillas internas, placa levantada y placa de base permiten una unión oculta que funcione de la misma manera que el sistema CAR frente al fuego, y una apropiada elevación desde el suelo la que permite una mejor aislación de la humedad y por lo tanto una mayor durabilidad.

Este conector está diseñado para recibir pilares de todas las dimensiones y soporta una fuerza de carga horizontal máxima de 50.64 [Kn], por lo que el momento máximo es de 7.6 [kNm].

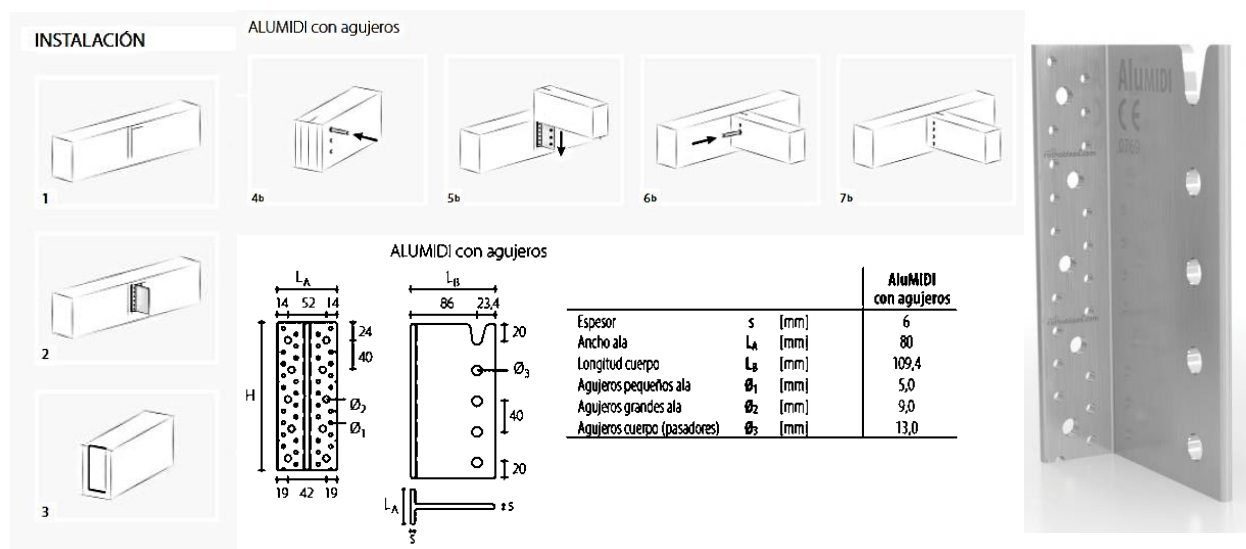


Ilustración 160. Unión oculta para vigas ALUMIDI 120 con agujeros, Rothoblaas prototipo Chile. Catálogo Placas y conectores para madera Rothoblaas 2019.

3 Ensamble de espera con cajeadado y pasadores, Sistema CAR

Unión realizada robóticamente a través de procesos computacionales de precisión. Dentro de las uniones establecidas es la que presenta mayor complejidad de realización, ya que no solo se debe precisar el corte de la pieza de madera, sino que el ensamblaje de los distintos marcos se debe realizar con ayuda de maquinaria. Por otra parte, la madera como material tiene transformaciones naturales tanto a la humedad como al calor, de tal manera que no siempre la precisión del corte permitirá un mayor calce de las piezas.

Se agrega al ensamble pasadores de acero para una mayor resistencia al corte, y mayor rigidización de la unión, la cual considera una dimensión de lado a lado de 6.3 m, y cada marco pesará 1 [Tn] aprox.

Se establece un diseño paramétrico a través de modelamiento en Rhinoceros y mecanización por Grashopper para utilización de brazo robótico.

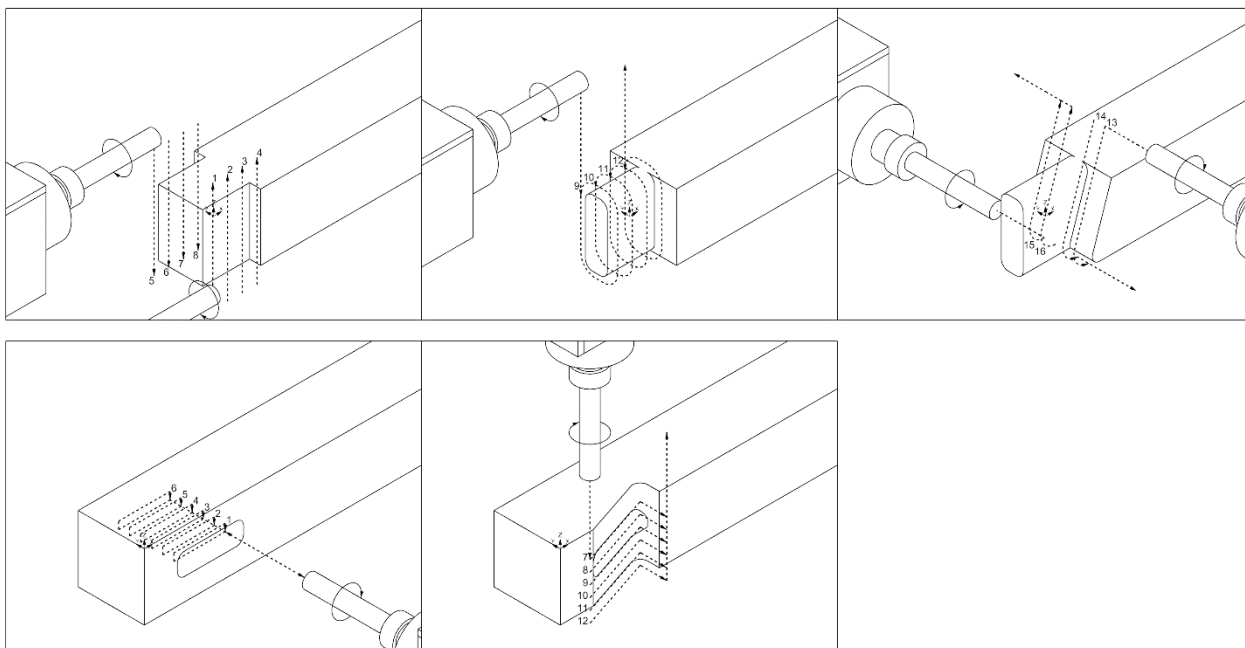


Ilustración 161. Pasos de mecanización robótica para confección de ensamble de espera con cajeado. Elaboración Francisco Quitral.

7.2.1 Proceso de Mecanización

El proceso de mecanizado se realiza finalmente en la planta aserradero de VOIPIR, Villarrica, donde posteriormente a recibir la madera laminada se comienza el proceso de programación y mecanización del robot para la confección de las piezas de ensambles de la estructura.

Junto a esto, también se realizan diversos procesos previos, como son la confección de la madera laminada solicitada, la compra de insumos y herramientas propias para el proceso de mecanización, los procesos administrativos de mano de obra para la realización de la mecanización y los posteriores procesos de ubicación del prototipo y temas logísticos de bodegaje y licitaciones.

Para el proceso de mecanizado se define la utilización de los programas computacionales Rhinoceros 6.0 y Grasshopper plug-in para la programación de funcionamiento del robot, y los siguientes elementos de producción:

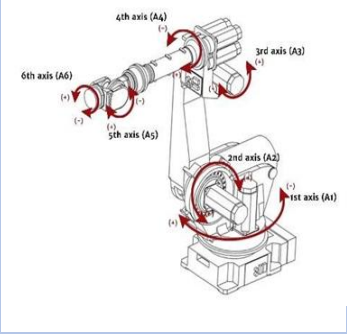
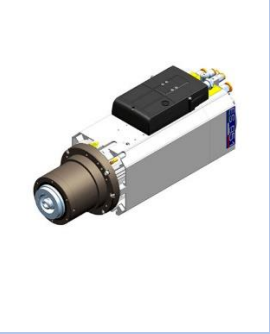
Brazo Robótico KUKA KR2240_2:	Fresa Recta cuchillo interior:	Cono portapinza iso30 – ER32	Electro-husillo ES_951:
6 ejes de Libertad	20/19 mm diámetro	50 mm diámetro	Con sistema de apriete automático
240 kg de soporte de carga	250 mm largo total	2-20 mm Capacidad	Motor Asincrónico
Robot modificado y armado por partes	200 mm largo útil	1 mm rango apriete	Velocidad de rotación Máx.: 24.000 rpm Mín.: 8.000 rpm
Soporte en riel F.EE GmbH		60 mm largo	
			

Tabla 4. Herramientas utilizadas en el proceso de mecanizado de estructura primaria, Prototipo Chile. Elaboración Propia.

Además, como herramienta anexa, se utilizó el puente grúa proveniente de Voipir, con el cual se transportaron las piezas de madera para ser mecanizadas y/o cambiar piezas del sector de trabajo. Este puente grúa, considera el ancho total del galpón de Voipir, que considera 28 m y soporta una carga total de 3.2 Toneladas.

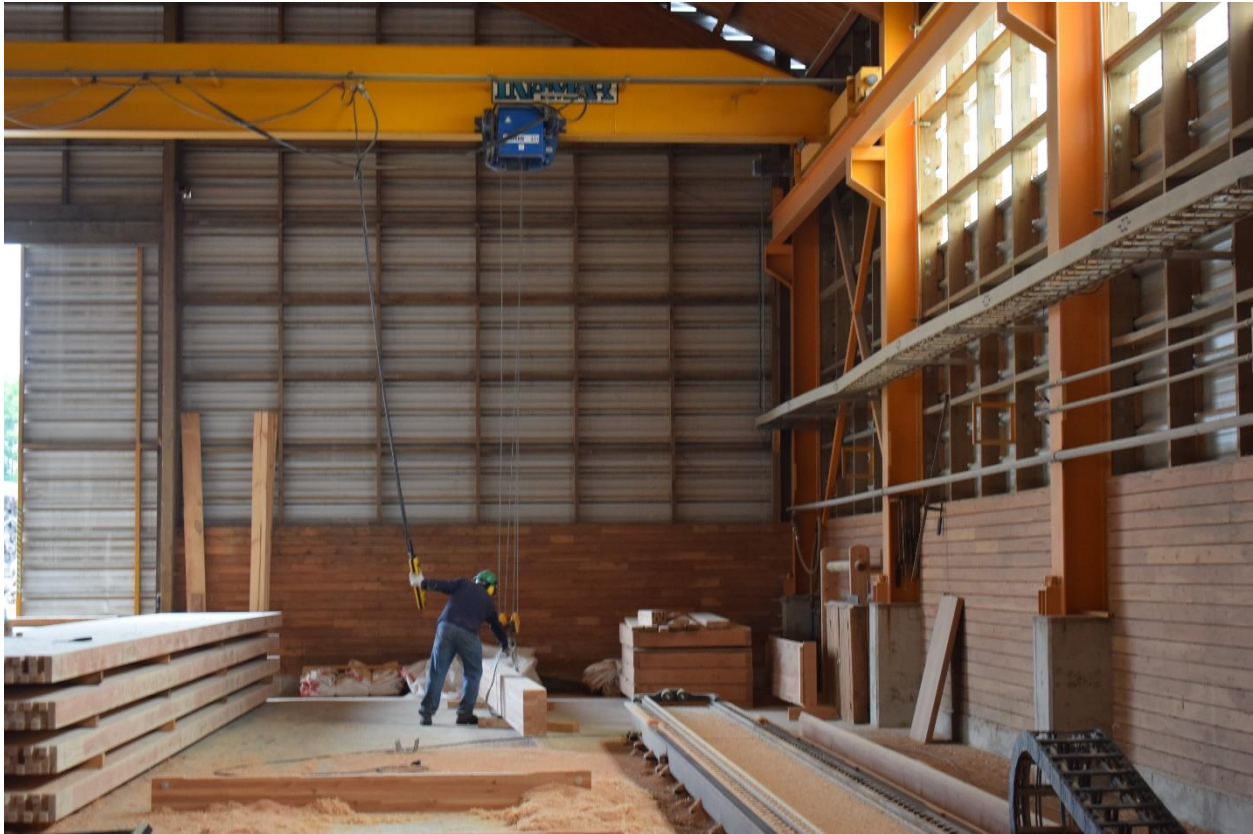
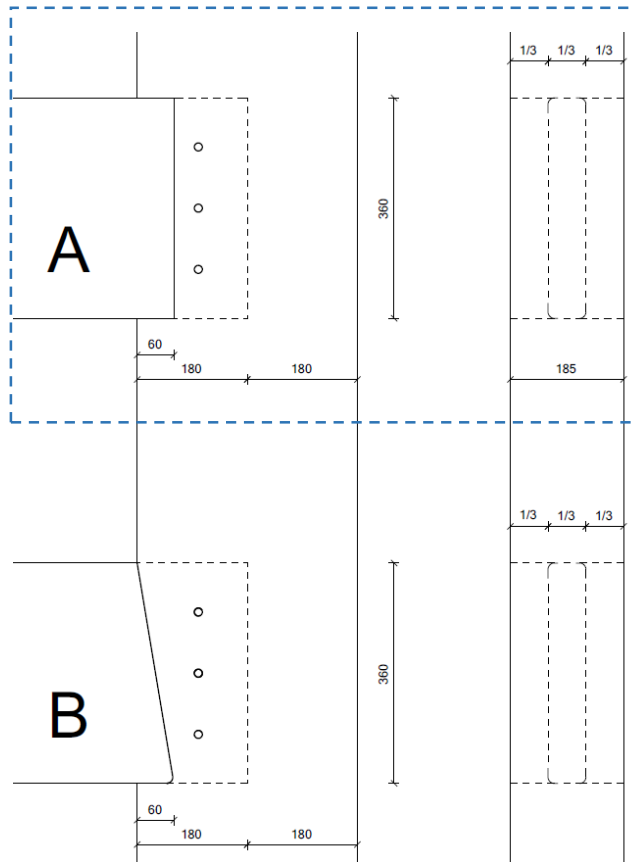


Ilustración 162. Puente Grúa Voipir, Villarrica. Movimiento de viga para mecanizado. Elaboración Propia.

Para el proceso de mecanizado se determina una prefabricación de 24 espigas en 12 vigas de 185x360 mm de sección y 6300 mm de largo. Y 24 cajas en 8 pilares de sección 185x360 mm y 6600 mm de largo. Éstos ensambles, conforman la cantidad de 4 marcos transversales de la estructura primaria del prototipo Chile. La madera laminada corresponde a madera de Pino Oregón, proveniente del mismo aserradero Voipir, considerando un producto de origen nacional y con procesos de control de forestación.

Para definir el diseño final del ensamble a realizar, se consulta a un ingeniero calculista, corroborando así el diseño más eficiente del marco estructural. Este desarrollo de cálculo, se realiza previo al proceso de mecanizado, dejando definido el diseño final antes de comenzar a construir los ensambles.



Se define la opción A como la unión más eficiente para la realización del marco estructural del prototipo Chile, estableciendo una caja de profundidad total de 190 mm considerando 60 mm de espera y 130 mm de espiga. Esto con motivo de una conseguir una mayor separación de los pasadores con el hombro. Considerando lo anterior, se actualiza el modelo total de la estructura del Prototipo Chile y la programación del mecanizado.

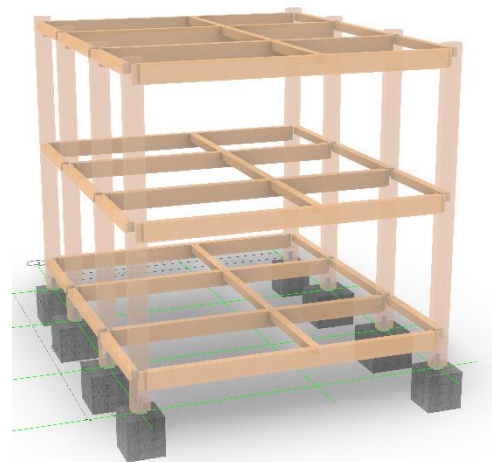


Ilustración 163. Opciones de diseño de ensamble de caja y espiga de espera con cajeado. Elaboración Francisco Quiral

Además, se realiza una bitácora del proceso de mecanizado (revisar tabla completa en anexo 4), la cual incluye no sólo los pasos a seguir en los días de trabajo, sino que también el tiempo y los costos asociados, de tal manera de poder establecer empíricamente las ventajas de la producción pre-fabricada y la construcción con proceso robóticos de alta precisión.

Para esto se realiza una división de la bitácora, la cual se fracciona en 3 procesos de desarrollo:

1. Organización o procesos previos: Se debió realizar una secuencia de procesos de preparación del mecanizado, considerando procesos logísticos propios de los insumos o herramientas a utilizar y/o factores económicos para el desarrollo de todas las partidas. Para estos procesos se había determinado un tiempo de un mes aproximadamente, el cual se extendió debido a diferentes factores propios de cada proveedor y procesos del concurso.
2. Programación: En principio se refería al proceso de diseño para el mecanizado de las piezas, el cual iba previamente preparado, sin embargo, al llegar a Voipir existieron problemas de programación del robot, el cual al calibrarlo mostró un error de 1.8 mm que es demasiado para el proceso de mecanización. Es así como el proceso de programación se extendió a 2 días extras, para solucionar el problema de origen del brazo robótico Kuka (programación de funcionamiento) y posteriormente probar el programa de mecanizado, previamente ensayado en Grasshopper.
3. Mecanización: Desarrollo de la fabricación de las piezas de ensamble a través del brazo robótico KUKA. Este proceso tenía como origen el desarrollo de la programación para la fabricación de las espigas y las cajas, sin embargo, debido a los acontecimientos ocurridos con el robot, solo se definió la programación completa de las espigas y se deja pendiente la programación y fabricación de las cajas para un proceso posterior.

Cada uno de estos procesos conlleva tiempos y costos asociados, los cuales permiten comparar las ventajas del proceso completo de la edificación realizada con madera y procesos de manufactura robótica con la misma edificación en otros materiales y procesos constructivos in-situ.

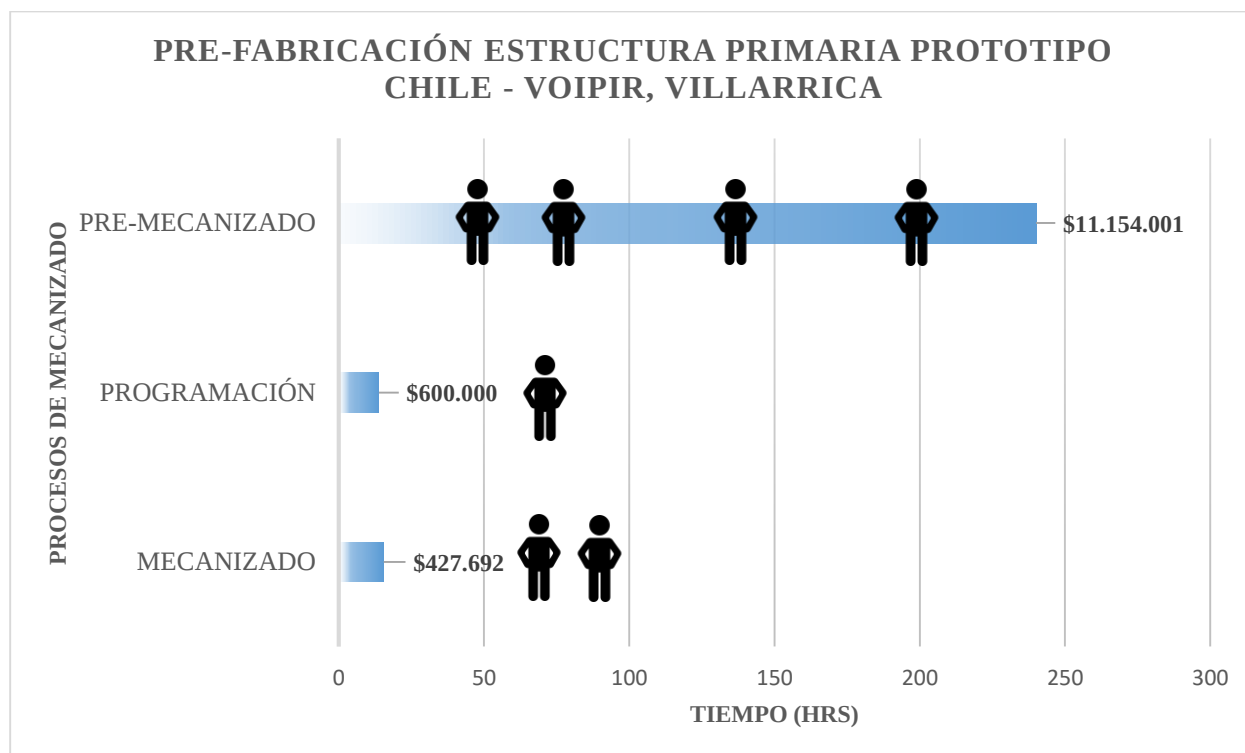


Diagrama 4. Diagrama comparativo de procesos de mecanización Tiempos y Costos. Elaboración propia. (Anexo 4)

De este gráfico se puede resumir que el proceso más largo al momento de construir, es el proceso de organización, donde se debe definir todos los elementos a utilizar en el proceso y los ajustes de diseño. Es así como al momento de proyectar, se debe determinar tiempos mayormente flexibles, ya que, si bien siempre se proponen los tiempos aptos, nunca terminan siendo los definitivos. Por otra parte, los costos no siempre son lineales con los tiempos, definiendo los mayores gastos en los materiales y la mano de obra.

7.2.2 Prototipo Mecanizado

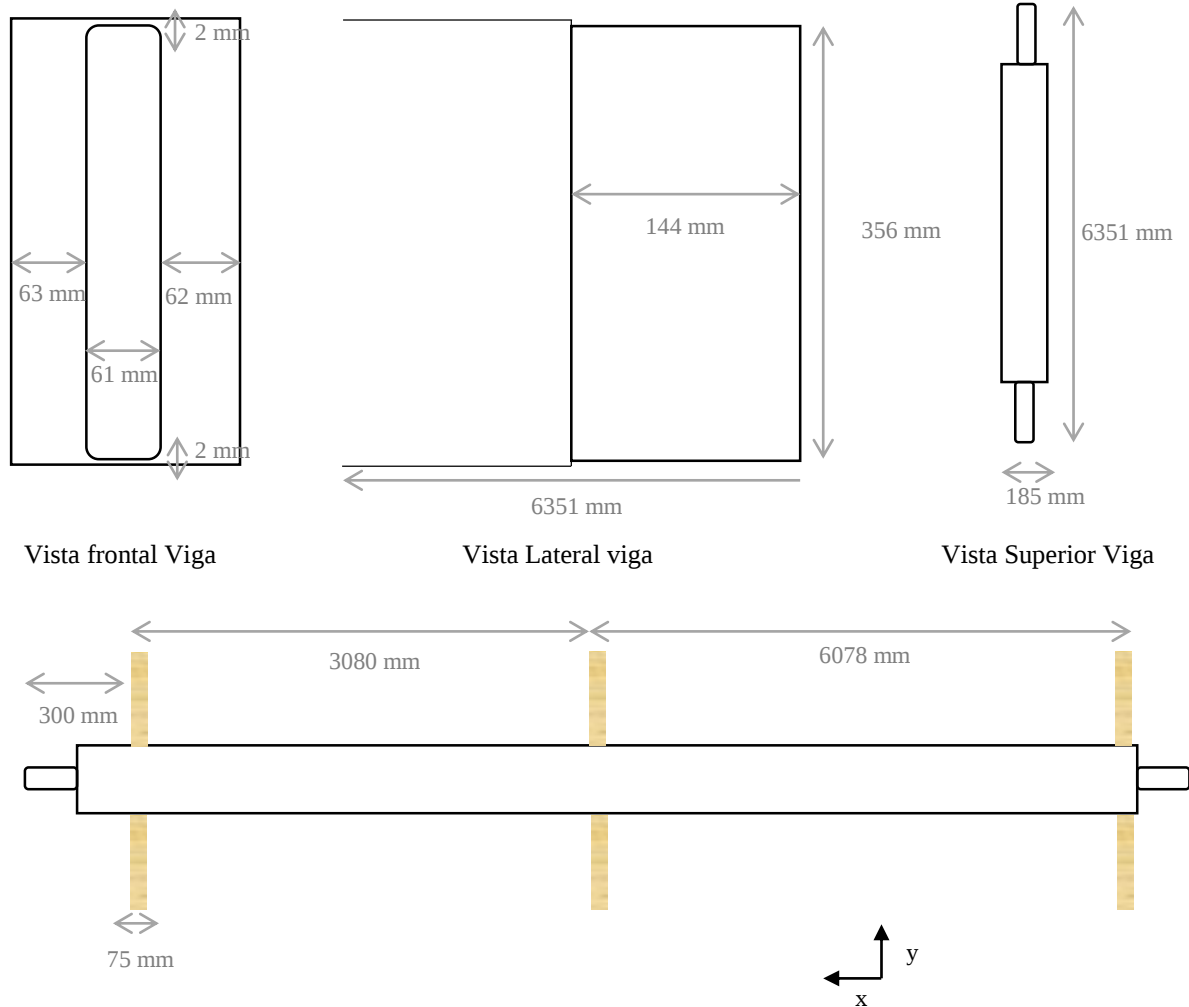
Con las uniones carpinteras y la programación del robot resueltas, comienza el proceso de mecanización con el robot manipulador de la estructura primaria del prototipo Chile a escala 1:1. Con este proceso de mecanizado, se permitió cuantificar los tiempos involucrados en todas las actividades del proceso de fabricación de la estructura, de tal manera de poder tener un comparativo directo con los mismos procesos y diferentes materiales.

El mecanizado del prototipo Chile considera:

- Mano de obra promedio de 2 personas y un brazo robótico KUKA
- Mecanización de 12 vigas de escuadría 185 x 360 x 6300 mm y 8 pilares de 185 x 360 x 6600 mm
- Utilización de madera laminada de Pino Oregón
- Peso estimado de estructura completa 5600 kg
- 9 días de mecanizado con jornadas de 8 horas diarias para los 4 marcos con CAR
- 72 repeticiones de proceso de mecanizado para confección de 1 espiga que brinda un total de 144 mm de largo de espiga.
- Trayectoria con corte: Velocidad= 0.15 m/s
Tiempo= 2.79 seg
Profundidad= 2 mm Ancho= 8 mm
- Trayectoria sin corte: Velocidad= 0.15 m/s
Tiempo= 1.06 seg
Profundidad= 2 mm
- Trayectoria acabado espiga : Velocidad= 0.05 m/s
Tiempo= 19.03 seg
Profundidad= 2 mm Ancho= 8 mm
Tolerancia= 0.2 mm
- Trayectoria completa (1 repetición): Tiempo= 1.17 min
(72 repeticiones) Tiempo= 84.24 min (1.4 horas)

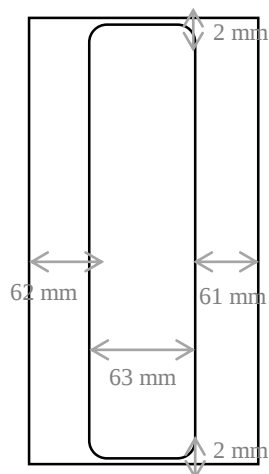
(1 viga – 2 espigas) Tiempo= 168.48 min (2.8 horas)

(12 vigas - 24 espigas) Tiempo= 2021.76 min (33.7 horas)

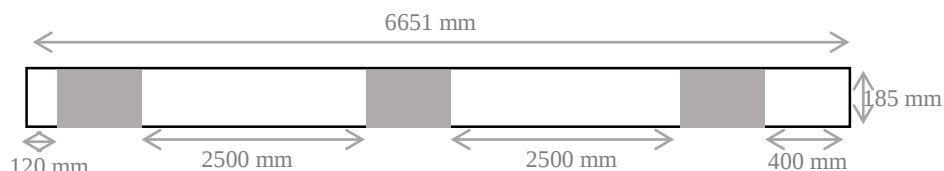


Esquema de espacio de trabajo o mecanización de espiga de vigas. Vista en Planta.

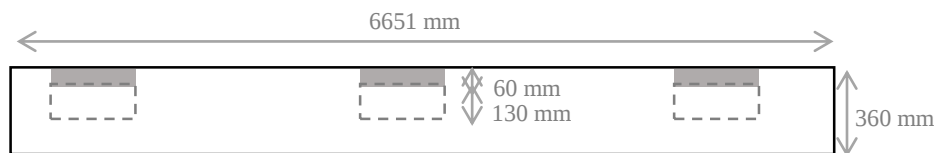
- 32 repeticiones de proceso de mecanizado para confección de 1 hombro sin caja que brinda un total de 64 mm.
- Trayectoria con corte: Velocidad= 0.15 m/s
Tiempo= 1.04 min
Profundidad= 2 mm Ancho= 8 mm
- Trayectoria sin corte: Velocidad= 0.15 m/s
Tiempo= 2.26 seg
Profundidad= 2 mm
- Trayectoria acabado espiga : Velocidad= 0.05 m/s
Tiempo= 42.37 seg
Profundidad= 2 mm Ancho= 8 mm
Repeticiones= 67 repeticiones, total de 134 mm
- Trayectoria completa (1 hombro): Tiempo= 33.28 min
(1 caja) Tiempo= 47.31 min
(1 caja completa) Tiempo= 80.59 min (1.34 horas)
(8 pilares - 24 cajas) Tiempo= 1934.16 min (32.2 horas)



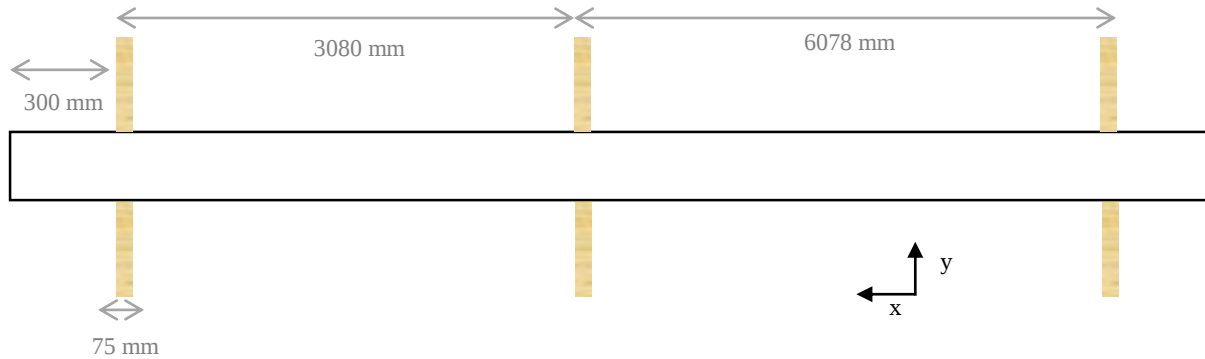
Vista Superior de caja



Vista Superior Pilar con cajas



Vista Lateral pilar con cajas



Esquema de espacio de trabajo o mecanización de cajas en pilares. Vista en Planta.

- Costo Material – Madera Laminada de pino Oregón = **\$8.372.001**
- Costo Total mano de obra= **\$600.000**
- Costo total proceso Mecanizado= **\$600.000**
- Costo Total Insumos= **\$1968000**

COSTO TOTAL PROCESO= \$11.540.001

- Tiempo Total Pre-Mecanizado = **443 hrs**
- Tiempo Programación= **13.8 hrs**
- Tiempo proceso Mecanizado espigas= **33.7 hrs**
- Tiempo proceso Mecanizado cajas = **32.2 hrs**

TIEMPO TOTAL PROCESO= 522.7 hrs

TIEMPO TOTAL DÍAS LABORALES= 65.3 días de 8 horas x día

Al realizar la comparación de la prefabricación de la estructura primaria del prototipo chile con otros materiales, se debió realizar un comparativo cuantitativo y cualitativo, de tal manera que, si bien se puede diferenciar rápidamente

los costos y tiempos, también existe una serie de factores que afectan al gasto general post-construcción. De esta manera, es que se establece una serie de factores fundamentales de evaluación para un comparativo directo de la vida útil del prototipo.

Items	MADERA LAMINADA	ACERO	HORMIGÓN ARMADO
Costos	\$ 8.982.500	\$ 9.145.698	\$ 7.521.132
Tiempos	20 días		60 días
Emisión CO2 [Kg]	233,88	418,22	2025,7
Mano de Obra (pers)	3		
Resistencias ⁶	Tensión= mayor a acero Compresión= 70 Mpa Flexión	Tensión= 400-500 MPa Compresión= menor al HA Flexión	Tensión= menor al acero Compresión= 70 Mpa
Peso Estructura [Kg]	5600	4825	40514,4
Ductilidad	✓	✓	Mayor riesgo de colapso al sismo
Pre-fabricación	✓	✓	Menor Libertad de diseño
Posibilidad de expansión	✓	✓	Mayor complejidad
Ignifugación	Mayor resistencia eléctrica y térmica	Conduce y transmite calor (acelera proceso de colapso)	Demora hasta llegar a refuerzos
Consumo de Energía post-ocupación ⁷⁸	12%	27%	16,50%
Reutilización	✓	✓	NO

Tabla 5. Comparación para estructura Prototipo Chile. Elaboración propia.

⁶ Análisis de Datos de ingeniería [46]
⁷ Publicación científica de Consumo de energía a nivel mundial [51]
⁸ Paper científico de eficiencia energética [45]

Según el itemizado de costos, aún sigue siendo más rentable la construcción en hormigón armado, esto considerando que las piezas de madera laminada son personalizadas y en menor cantidad de m³. Por lo que se asume, que al explotarlo a nivel edificio, los costos asociados disminuirán y aumentarán los tiempos de construcción del hormigón.

Así mismo, existen factores cualificables que afectan directamente a los costos de las viviendas, en este caso del prototipo, como son los factores de post-ocupación. En este aspecto, es donde los materiales de la estructura cobran un mayor valor, así también el diseño y los procesos previos a la construcción, de tal manera que las decisiones incorporadas al resultado final son las que posteriormente evitarán mayores gastos. Algunas de las decisiones que afectan mayormente al consumo post-ocupación, son las características propias de los materiales de construcción, es decir, en este sentido es que la madera cobra un mayor valor con respecto al resto de los materiales comparados.

La madera cuenta con características propias del material que favorecen de muchas maneras el consumo post-ocupación, el que al año 2017 era un 40% del total de consumo de energía del mundo [45]. Esto, al plantear que la madera es el que contempla mayor aislación térmica y eléctrica, lo que permite un mejor rendimiento, también es más duradero y tiene mayor facilidad de incorporación de elementos prefabricados, lo que también a su vez implica menos puentes térmicos, y por último contempla una aislación acústica propia del material que no sólo favorece al costo de los materiales complementarios como es la aislación, sino que también permite una mejor calidad del sonido y de habitabilidad cuando se trata de viviendas sociales y/o comunitarias [46].

Finalmente existen factores fundamentales al momento de escoger los materiales de construcción, y de esta manera la madera sobresale en muchos aspectos. Principalmente y más relevante son las emisiones de CO₂ en toda la vida útil del material, los procesos de prefabricación y rapidez de montaje, la posibilidad de expansión y finalmente la reutilización o reciclaje de los materiales. De esta manera, es que como arquitectos y/o diseñadores, es que debemos hacernos responsables de los nuevos requerimientos del área de la construcción, para hacerse cargo de los cuidados necesarios y prioritarios que se debe tener hacia el planeta y el futuro.

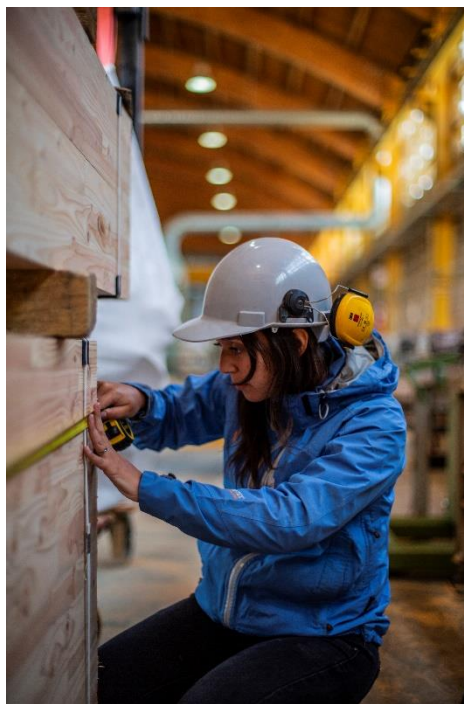


Ilustración 164. Fotografías del proceso de mecanizado. Elaboración propia y

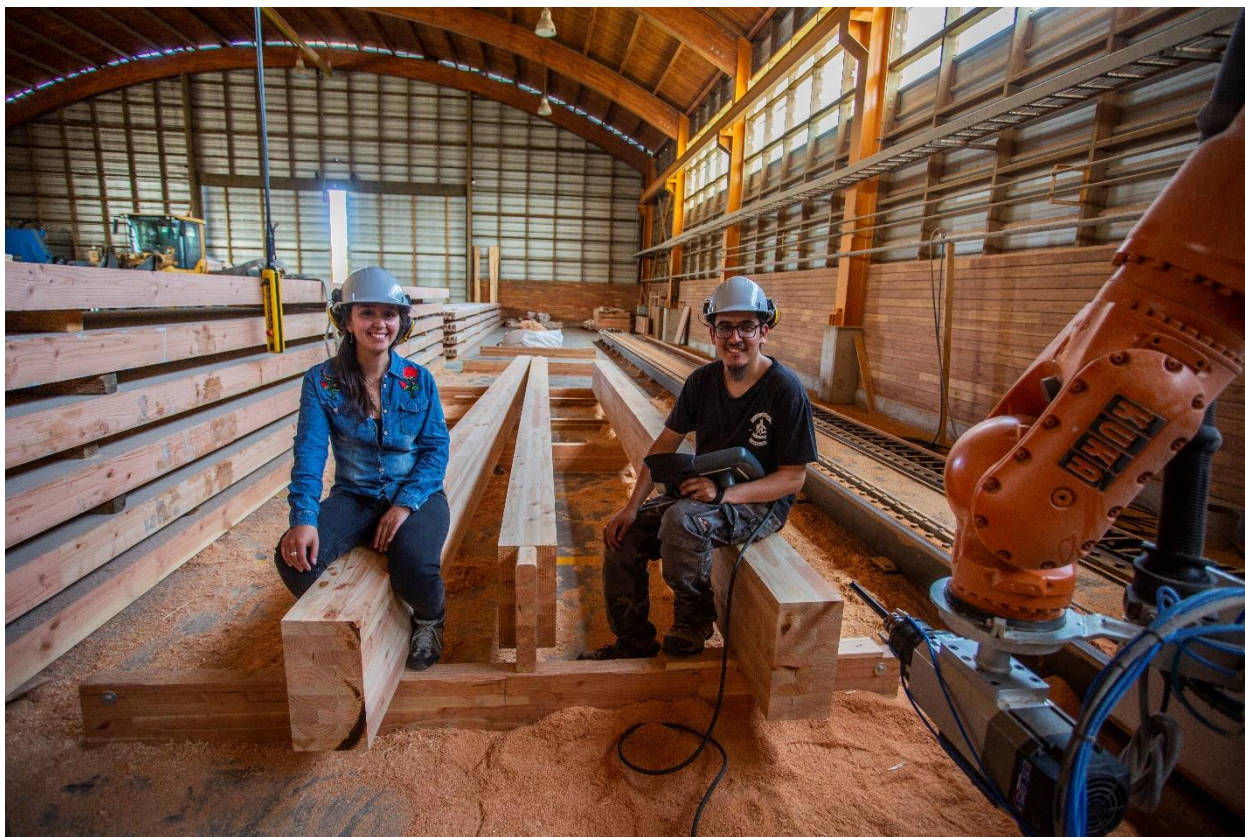


Ilustración 165. Mecanización de espigas estructura primaria Prototipo Chile-VOIPR, Villarrica. Elaboración

CONCLUSIONES

Las edificaciones de mediana altura en madera están en un proceso de desarrollo constante en los últimos años, y principalmente en Chile, donde no solamente se demuestra en la incorporación de nuevos materiales de madera ingenieril al país, sino que también en la incorporación de sistemas estructurales mixtos e innovadores, que a través de los avances de la técnica han posibilitado la optimización estructural de tipologías clásicas estructurales.

Según los antecedentes recabados en esta investigación, se puede establecer una nueva definición de construcción de edificaciones en madera, plasmando una nueva clasificación de sistemas constructivos, los que se clasificarán de una manera flexible, con o sin incorporación de acero, definiendo un nuevo desarrollo y características estructurales.

El nuevo desarrollo y actualización de los sistemas estructurales en madera para edificaciones de mediana altura, deja una impresión de rediseño de los sistemas constructivos ya conocidos, donde no solo se incorporan las antiguas metodologías constructivas, sino que también se plantea una nueva manera de incorporación de los materiales y mejoras en sus características estructurales. Un ejemplo de esto, son los entramados pesados, pasando a ser un punto fundamental de rediseño, utilizando dimensiones de grandes escuadras, pero propuestas con madera laminada ingenieril, lo que aporta mejores comportamientos, tanto estructurales como de resistencia al fuego. Además, se reinventan las uniones carpinteras antes desarrolladas de manera artesanal, lo cual utilizaba mayores tiempos de construcción y menor cantidad de mano de obra especializada para la fabricación, de tal manera de aumentar su precisión de fabricación, lo que reduce las incertidumbres de comportamiento estructural. Esto es un punto fundamental para esta investigación, donde no solo se manifiestan las ventajas de los procesos robotizados para su fabricación, sino que además plantea un enfoque industrializado y que es posible incorporarlo en la actualidad en el país, para el progreso de la construcción en madera.

Bajo las características anteriormente mencionadas, se señala que a través del proceso de mecanización robotizada, quedan establecidas varias ventajas a evaluar, tales como; la baja mano de obra requerida para los procesos de prefabricación, que a su vez disminuye los costos; los tiempos asociados al proceso de producción de los elementos estructurales y a todo el proceso de prefabricación, que disminuye considerablemente comparado a otros sistemas

constructivos de madera, que necesitan más mano de obra y carga pesada, también la comparación de características cualitativas con otros materiales y similares características, las cuales si bien no son demostradas cuantitativamente, puedes ser fácilmente comparables y demostrar una ventaja directa del sistema constructivo propuesto. Una de las etapas del ciclo de vida del proceso más relevantes, es la del diseño, ya que esto puede prever de futuros consumos posteriores de post-ocupación que afectan directamente con el gasto general del prototipo, lo cual no queda demostrado directamente en esta investigación, más si podrá ser evaluado en los trabajos futuros.

Según la investigación realizada, y con todos los antecedentes y precedentes recabados se puede dar paso a responder a las preguntas planteadas para la realización de la hipótesis:

1. ¿Es posible justificar técnicamente el desarrollo de edificaciones de mediana altura en madera usando solo carpintería de armar robotizada?

R. Existen variadas justificaciones de las ventajas que ofrecen los sistemas estructurales que utilizan carpintería de armar robotizada, de las cuales se pueden definir técnicamente 3. La primera corresponde a la unión específica para el sistema constructivo propuesto de pilar-viga, las cuales, al ser uniones elásticas o no completamente rígidas, aportan a la estructura completa de la edificación, brindado una mayor resistencia a los movimientos y daños producidos por los sismos. En segundo lugar, al proponer un sistema estructural ortogonal, permiten una mayor flexibilidad a los diafragmas del diseño, permitiendo un desarrollo más rápido y eficiente en términos de aumento de altura modular y como elementos para uniones de CAR. Finalmente, al utilizar solo carpintería de armar robotizada en las uniones, brinda a la estructura propuesta una mayor resistencia al fuego, aumentando el tiempo de colapso de ésta, carbonizando los elementos de madera antes de llegar al núcleo para el posterior colapso.

Sin embargo, al momento de diseñar los puntos de unión y/o más de un ensamble en un mismo punto, esto puede ocasionar algunas problemáticas; principalmente debido a la sección utilizada, es que se debe definir cuáles son los requerimientos mínimos para que la unión sea correctamente funcional, refiriéndose a los largos de las espigas o a las dimensiones mínimas de apoyo u hombro. De esta manera, es que no siempre existe la posibilidad de poder crear un sistema constructivo que funcione completamente con uniones CAR, ya que como se indica precedentemente, ésta utiliza grandes secciones y por ende, más espacio interior en un punto de unión. Finalmente, para el caso de la

mecanización del prototipo, se pudo determinar que no era posible unir en el caso extremo del diseño, tres vigas en un mismo pilar, no solamente por las dimensiones de los elementos y espigas, sino que también por dificultades de montaje posteriores.

2. ¿Es posible desarrollar un sistema estructural, reconfigurable y modular, en carpintería de armar que permita transformabilidad arquitectónica post-construcción?

R. En esta investigación particularmente se desarrollaron dos áreas de implementación de sistema CAR y reconfiguración o transformabilidad para el diseño final del sistema estructural. Basados en los antecedentes recabados, se pudo determinar que la tipología constructiva más favorable a la transformabilidad espacial es el sistema constructivo de Pilar- Viga, el cual en proporciones ortogonales y simétricas no requiere de rigidización de diagonales, dejando solo diafragmas de relleno como estructura secundaria. Es así, como se determina la estructura primaria como un entramado pesado de madera laminada ingenieril, en base a un sistema de Pilar-Viga que será prefabricado y modular, lo cual, según precedentes, confirma la mejora en los tiempos de diseño y construcción, además de los costos. Esto, se pudo corroborar al momento de la mecanización de los elementos que conforman el marco estructural del prototipo Chile, donde no solo se determinó la rapidez del proceso de prefabricación, sino que también las ventajas del diseño que posteriormente influyen en los costos y los tiempos. Por tanto, si bien los antecedentes recabados durante las actividades de investigación diseño y fabricación permiten aventurar una respuesta afirmativa a la pregunta, la consideramos como inconclusa por falta de desarrollo.

Por otra parte, se desarrollaría una estructura secundaria de entramados ligeros unidos en base a carpintería de armar robotizada, los cuales permitirán una transformabilidad arquitectónica post construcción y la movilidad del muro o reubicación dentro de la retícula interior. Esto particularmente, no se llegó a concretar de una manera más completa o con la suficiente información, considerándola actualmente como un punto de trabajos futuros.

3. ¿Ofrecen los sistemas estructurales de carpintería de armar en madera ventajas en su huella de carbono comparados a otros materiales constructivos usados en viviendas de mediana altura?

R. Los árboles por sí mismos, producen uno de los materiales que no emite huella de carbono, sino por el contrario la absorbe en toda su vida natural; los sistemas estructurales en madera de por sí, serán mayormente sustentables.

Además, si le sumamos el que sea un sistema diseñado para ser prefabricado y modular, la disminución de la huella de carbono disminuirá aún más en el ciclo de vida de la edificación, disminuyendo las emisiones con menor uso de maquinaria, menor polución al prefabricar y menor polución en la construcción. La madera emite un 10.9% del total de las emisiones de CO₂ de Acero y un 17.8% del total de las emisiones de CO₂ de una estructura de hormigón en todo su ciclo de vida, considerando la emisión de la estructura desde su extracción hasta su construcción.

En definitiva, si a este sistema estructural de madera se le agrega el factor de utilizar carpintería de armar robotizada, las emisiones de CO₂ disminuyen aún más, ya que al utilizar conectores de acero aumenta no solo el peso total de la estructura, sino que, además, las fabricaciones de las piezas de acero producen más CO₂ que la fabricación de ensambles en base a carpintería de armar robotizada. Por otra parte, no solo aumenta las emisiones de CO₂ totales del edificio, sino que aumentará un costo aproximado de un 40% del total del costo. Además, sumado a todo lo descrito, la utilización de madera laminada confeccionada de manera nacional y sustentable, con un manejo forestal desde su origen, además de aportar a los beneficios de la emisión de CO₂ de la materia prima, brinda al proyecto un plus de sustentabilidad muy importante en su ciclo de vida. Esto concluye que, se puede evaluar el ciclo de vida de un proyecto sustentable, brindando en algunas etapas fundamentales, las condiciones necesarias para que sea aún más eficiente en su emisión y en el uso de la energía.

En consecuencia, en base a estas respuestas y a todo el proceso de desarrollo y conclusión de ésta investigación es que se determina que la hipótesis planteada es verdadera, volviéndose una tesis de investigación:

Tesis: Los sistemas estructurales en madera ingenieril para edificaciones de mediana altura, basados en carpintería de armar robotizada, permiten transformabilidad arquitectónica post-construcción y menor huella de carbono durante la producción de materiales y la construcción del edificio.

POSIBLES CONTRIBUCIONES:

A través de los objetivos planteados en un inicio de la investigación, es que se establece las posibles contribuciones logradas. De esta manera, se realiza una clasificación de las contribuciones que responde de manera concreta a los objetivos mencionados. Esto a través de un sistema de evaluación de madurez tecnológica llamado “*Technology Readiness Levels (TRLs)*” los cuales son definidos por la NASA en la actualidad, pero que brindan un uso internacional en el sector industrial para delimitar el grado de madurez de una tecnología [47]:

TRL 2 - Concepto Tecnológico formulado: Al trabajar con un aserradero nacional, se pudo determinar los niveles de CO₂ producidos en la fabricación de la estructura primaria. Al tener una distancia de traslado menor de 800 km se disminuye considerablemente la huella de carbono por traslado. Los procesos robóticos producen menor polución. Al ser un sistema estructural en base a CAR, se establece una menor contaminación de producción de acero.

TRL 3 – Prueba de concepto experimental: Al realizar uniones de carpintería de armar, se pierde sección de los pilares o las vigas, por lo cual se requiere una mayor escuadría de los elementos de madera para un mejor comportamiento estructural. Las dimensiones de las espigas y las cajas, dependerán de las características propias de los elementos de madera, las cuales deben ser corregidos in-situ.

TRL 4 – Tecnología validada en laboratorio: Los tiempos y eficiencia de los procesos de manufactura robótica dependen de factores tanto de programación como de los elementos o herramientas utilizadas. Esto se establece, tanto en la programación interna del brazo robótico, como en las condiciones propias del espacio de trabajo y la eficiencia de la programación planteada para un correcto manejo de usuarios externos.

TRL 7 – Demostración de prototipo en entorno operacional: Al construir una edificación mayor a un nivel de altura y de manera modular, las mayores dificultades son las dimensiones de los elementos utilizados para su construcción, estableciendo la utilización de herramientas y maquinarias necesarias para el proceso, como son las grúas de cargas. Esto a su vez requiere de mayor mano de obra para movimientos y espacios de trabajo de mayor dimensión para un correcto manejo.

TRABAJO FUTURO

Solar Decathlon 2020

- Montaje estructura primaria Prototipo Chile – Febrero de 2020
- Construcción partidas Prototipo Chile – Marzo a Mayo 2020
- Asistencia y construcción muros transformables para Prototipo Chile – Abril a Mayo 2020
- Asistencia en estructura prototipo USA – Julio 2020

Otros

- Participación Paper en 35th PLEA CONFERENCE: PLANNING POST CARBON CITIES, Coruña, España – 1 al 3 de Septiembre de 2020

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. d. l. Construcción, «Diario de la Construcción,» Las Últimas Noticias, 2017. [En línea]. Available: <https://www.diariodelaconstruccion.cl/edificios-de-madera-se-construiran-en-rancagua/>. [Último acceso: 08 Mayo 2019].
- [2] P. Francisco Javier Valdés, «Construir con Madera en Altura: La Reinención del Árbol,» *Revista COTA*, vol. Marzo, nº 8, pp. 14-17, 2019.
- [3] T. M. USM, «Design Development Project Manual,» Valparaíso, 2019.
- [4] D. W. Linda Groat, *Architectural Research Methods*, second edition, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [5] X. Borràs, «Breve historia de la madera como material de construcción,» *Tecnología y Equipamiento para la Industria de la madera*, p. 2, 2010.

-
- [6] M. Rivas, «Viajestic,» atresmedia, 26 03 2015. [En línea]. Available: https://viajestic.atresmedia.com/curioso/ultima-tribu-canibal-mundo-vive-arboles_2015032457ea4bbe0cf26658235db504.html.
- [7] X. Borrás, «interempresas,» Interempresas Media, S.L.U. - Grupo Nova Àgora, 20 Octubre 2010. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/Madera/Articulos/44265-Breve-historia-de-la-madera-como-material-de-construccion.html>. [Último acceso: 07 Abril 2019].
- [8] S. Inat, «SISTEMA DE PLATAFORMA CON ENTRAMADO LIGERO DE MADERA,» Tesis de Magister, Cataluña, Barcelona, 2011.
- [9] C. A. y. C. S.A, «Ficha Técnica Arauco HILAM,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.arauco.cl/chile/wp-content/uploads/sites/14/2018/03/FICHA-HILAM-CHILE.pdf>.
- [10] LIGNUM, «LIGNUM Bosque, madera y Tecnología,» RSS, 6 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <http://www.lignum.cl/informes-tecnicos/los-desafios-del-clt-chile/#>.
- [11] Interempresas, «Gabarró Hermanos S.A,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Construccion/FeriaVirtual/Producto-Tableros-y-aglomerados-155609.html>.
- [12] M. B. J. Ramirez, «Los Entramados tradicionales de madera en Los cerros Alegre y Concepción,» UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA, Valparaíso, 2015.
- [13] G. Woodward, Country Homes, Nueva York: Broadway, 1973.
- [14] M. 21, «Madera 21 de Corma,» 26 Agosto 2016. [En línea]. Available: <http://www.madera21.cl/los-cinco-sistemas-constructivos-en-madera-mas-utilizados/>. [Último acceso: 10 Abril 2019].
- [15] U. Bristol, «University of the West of England,» Estructura de madera tradicional - Una breve introducción, 2008. [En línea]. Available: https://fet.uwe.ac.uk/conweb/house_ages/timber/section4.htm.
- [16] S. Giedion, «Espacio, Tiempo y Arquitectura: origen y desarrollo de una nueva tradición.,» *Histografía de la Arquitectura Moderna*, vol. 1, 2009.
- [17] C. y. D. U. d. B. B. Facultad de Arquitectura, Construcción en Madera, serie sistemas constructivos: Entramados de Madera -Libro 01, Concepción: Trama Impresores S.A, 2011.

- [18] M. C. Green, «THE CASE FOR Tall Wood BUILDINGS: How Mass Timber Offers a Safe, Economical, and Environmentally Friendly Alternative for Tall Building Structures,» Attribution Non-Commercial Share Alike, British Columbia, 2012.
- [19] E. Clark, TIMBER FRAMING: Journal of the Timber Framers Guild, British Columbia, Canadá: profusely illustrated. Embossed hardcover, 2011.
- [20] T. K. Waugh Thistleton, «Plataforma de Arquitectura,» ISSN 0719-8914, 14 Julio 2009. [En línea]. Available: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects>. [Último acceso: 2019 Abril 17].
- [21] E. HOOPER, «Detalle innovador: Centro de Innovación y Diseño en Madera.,» *Architect*, p. 2, 2015.
- [22] R. Abrahamsen, «Mjøstårnet - Construction of an 81 m tall timber building,» de 23. *Internationales Holzbau-Forum IHF 2017*, Moelv, Norway, 2017.
- [23] G. T. G. T. Beatrice Messeri, «Injuries, Past Repairs and Conservation Views for Stabilization of Sakyamuni Tower, China,» *Structural Analysis of Historical Constructions*, New Delhi, 2006.
- [24] S. L. J. Yuan, «Analysis and investigation of seismic behavior for multistory-pavilion ancient pagodas in China,» *Transaction on the Built Environment*, Yarzgzfzou, China, 2001.
- [25] C. U. d. I. e. Madera, «Madera UC,» Campus San Joaquín UC, 2017. [En línea]. Available: <http://madera.uc.cl/proyectos-todos/torre-de-penuelas>. [Último acceso: 7 Mayo 2019].
- [26] D. e. Día, «el Día,» Efe noticias, 3 Febrero 2019. [En línea]. Available: <http://www.diarioeldia.cl/tendencias/edificio-chileno-madera-que-se-convirtio-en-modelo-social-sustentable-para-latinoamerica>. [Último acceso: 7 Mayo 2019].
- [27] C. d. I. e. M. UC, «Madera UC,» Centro de Innovación en Madera UC, 2018. [En línea]. Available: <http://madera.uc.cl/proyectos-todos/edificio-iconico-de-rancagua>. [Último acceso: 8 Mayo 2019].
- [28] C. d. I. e. M. UC, «Madera UC,» Centro de Innovación en Madera UC, 2017. [En línea]. Available: <http://madera.uc.cl/proyectos-todos/barrio-oasis-de-chanaral-y-el-salado>. [Último acceso: 8 Mayo 2019].

-
- [29] M. 2. Corma, «madera 21,» Corma Chile, 16 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.madera21.cl/inauguran-en-chanaral-el-piloto-del-primer-edificio-en-madera-de-chile/>. [Último acceso: 8 Mayo 2019].
- [30] U. D. o. E. S. Decathlon, «Competition Guide,» Washington, DC. USA, 2018.
- [31] U. D. o. E. S. Decathlon, «Solar Decathlon,» U.S. Department of Energy., 28 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.solardecathlon.gov/blog/archives/5219#more-5219>. [Último acceso: 03 Junio 2019].
- [32] R. A. Española, «RAE,» Real Academia Española, 2018. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/?id=P65e6pL>. [Último acceso: 2019].
- [33] M. 2. Corma, «NUEVA MADERA MÁS TECNIFICADA Y SUSTENTABLE CONQUISTA A LA CONSTRUCCIÓN,» Madera 21, 2014. [En línea]. Available: <https://www.madera21.cl/nueva-madera-mas-tecnificada-y-sustentable-conquista-a-la-construccion/>. [Último acceso: 2019].
- [34] F. T. H. Arauco, «Celulosa Arauco y Constitucion S.A,» Enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.arauco.cl/chile/wp-content/uploads/sites/14/2018/03/FICHA-HILAM-CHILE.pdf>. [Último acceso: 19 Junio 2019].
- [35] Arauco, «Hilam Especial,» Arauco, [En línea]. Available: <https://www.arauco.cl/chile/marcas/hilam/hilam-especial/>.
- [36] C. maderas, «CERTIFICACIONES FORESTALES,» CMPC, [En línea]. Available: http://www.cmpcmaderas.cl/?page_id=270.
- [37] D. U. D. B. B. ING. JUAN MARCUS, «EDIFICACIONES CON PANELES DE CLT EN CHILE,» de *Seminario Internacional: Desafío País; Edificios en Madera*, Concepción, Chile, 2015.
- [38] E. S. T. p. P. Caballero, «Madera Laminada Cruzada (CLT): qué es y cómo usarla,» plataforma arquitectura, 6 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/893804/madera-laminada-cruzada-que-es-y-como-usarla>. [Último acceso: 19 Junio 2019].
- [39] C. maderas, «Qualimad Dimensionado,» CMPC, [En línea]. Available: http://www.qualimad.cl/?page_id=453.

- [40] C. A. Hewett, English Historic Carpentry, Fresno, California: Linden Publishing, 1997.
- [41] L. R. L. Quispe, «<https://www.usmp.edu.pe>,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.usmp.edu.pe/vision2018/pdf/Viernes/PRIMUS/9.00-10.30/Sismicos.pdf>. [Último acceso: 26 Septiembre 2019].
- [42] S. Gibson, «FineHomeBuilding,» The Taunton Press, Inc., Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.finehomebuilding.com/2014/10/24/the-house-that-shrugs-off-an-earthquake>. [Último acceso: 25 Septiembre 2019].
- [43] S. M. Luis Felipe González Böhme, Uniones carpinteras de Valparaíso, Valparaíso: RIL, 2019.
- [44] Rothoblaas, Placas y Conectores para madera, Santiago: Rothoblaas, 2019.
- [45] D. Environment, «Resource efficiency in the building,» ecorys, Rotterdam, 2014.
- [46] S. Carigliano, «Software de análisis estructural en la nube SkyCiv,» Ingeniería SkyCiv, 13 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://skyciv.com/technical/commonly-used-materials-in-structural-engineering/>.
- [47] A. Boldzsar, «Oficina Europea de I+D, Universidad Complutense de Madrid,» Universidad Complutense de Madrid, 26 Febrero 2016. [En línea]. Available: <https://oficinaeuropea.ucm.es/noticias/item/141-niveles-de-madurez-tecnologica-technology-readiness-levels-trls>.
- [48] M. Rivas, «Viajestic,» 26 Marzo 2015. [En línea]. Available: https://viajestic.atresmedia.com/curioso/ultima-tribu-canibal-mundo-vive-arboles_2015032457ea4bbe0cf26658235db504.html.
- [49] T. B. Yard, «The Barn Yard and Great Country Garages,» TBY, [En línea]. Available: <https://www.thebarnyardstore.com/post-and-beam-barns/joinery/?for=carriage-barn>. [Último acceso: 25 Marzo 2019].
- [50] Equipo MACORO UTFSM, «Memoria Constructiva MACORO,» CORMA, Santiago, 2018.
- [51] AIE, «Eficiencia del material en transiciones de energía limpia,» Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/material-efficiency-in-clean-energy-transitions#buildings-construction-value-chain>.

ANEXOS

1. Tabla de Requerimientos Estructurales. Elaboración propia.
2. Cubicación Primer Prototipo Chile. Elaboración propia.
3. Planimetría Prototipo Chile Final. Elaboración Taller Fenix 2.0.
4. Bitácora de Proceso de Mecanización
5. Tabla de Comparación de Prototipo Chile con otros materiales

