

Recomendaciones de Diseño en Madera Masiva para la Construcción de Edificios Inmobiliarios de Mediana Altura en Santiago

Vicente López Rojas
Profesor Guía: Gabriel Felmer
Seminario de Licenciatura: Tecnología
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Universidad de Chile

Tabla de contenido

Listado de Figuras	I
Listado de Tablas	II
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO	4
1.3 RESULTADOS ESPERADOS	4
1.4 ESTRUCTURA METODOLÓGICA	5
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 INTRODUCCIÓN	8
2.2 CONSTRUCCIÓN CON MADERA MASIVA	8
2.3 ECLOSIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS	17
2.4 MANUFACTURA NACIONAL	18
2.5 REQUERIMIENTOS INMOBILIARIOS	19
2.6 CONCLUSIÓN	22
3. METODOLOGÍA	24
3.1 INTRODUCCIÓN	24
3.2 CASO DE ESTUDIO	24
3.3 CRITERIOS DE HOMOLOGACIÓN	26
3.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO ESTRUCTURAL	27
3.5 ACONDICIONAMIENTO Y DETALLEMIENTO CONSTRUCTIVO	31
3.6 CONCLUSIÓN	31
4. RECOMENDACIONES DE DISEÑO	33
4.1 INTRODUCCIÓN	33
4.2 RESULTADOS HOMOLOGACIÓN	33
4.3 RECOMENDACIONES DE DISEÑO ESTRUCTURAL	33
4.4 RECOMENDACIONES DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO	40
4.5 RECOMENDACIONES DE CUMPLIMIENTO NORMATIVO	44
5. CONCLUSIÓN	48
6. BIBLIOGRAFÍA	50
7. ANEXOS	52
7.1 ANEXO A – CASO DE ESTUDIO - EDIFICIO "PALQUI"	52
7.2 ANEXO B – ITERACIÓN 1	53
7.3 ANEXO C – ITERACIÓN 2	60

I. Listado de Figuras

Figura 1: Stadthaus, 24 Murray Grove Origine, 13 Storey building, Fuente: Nordic Structures, 2017.

Figura 2: Uniones típicas entre paneles: a) Internal Spline, b) Single Surface Spline, c) Double Surface Spline, d) Half-Lapped Joint. (FPInnovations, 2011).

Figura 3: Unión perpendicular entre paneles. (FPInnovations, 2011).

Figura 4. A) Hold-Down HTT4 (Simpson Strong-Tie). B) Angle Bracket ABR255 (Simpson Strong-Tie)

Figura 5. Unión CBH, del proveedor Simpsons Strong-tie

Figura 6: Unión Spyder y Unión Pillar del proveedor Rothoblass

Figura 7. Detalle constructivo genérico (Fuente Polo Madera)

Figura 8. Planta Programa piso 1 Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 9. Planta Programa piso 2 Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 10. Tipología de departamentos Fuente: *elaboración Propia*

Figura 11. Morfología de Muros Estructurales originales Fuente: *elaboración Propia*

Figura 12. Listado de tamaños de muros originales v/s Listado de tamaños de muros optimizados fuente: *elaboración propia*

II. Listado de Tablas

Tabla 1. Estructura metodológica de investigación por capítulo

Tabla 2. Componentes Madera Masiva

Tabla 3. Sistemas constructivos puros y híbridos

Tabla 4: Exigencias térmicas O.G.U.C.

Tabla 5: Resistencia al Fuego O.G.U.C.

Tabla 6. Diferencias Edificio original e iteraciones

Tabla 7. Sistema estructural Segunda iteración

Tabla 8. Recomendaciones de Diseño Estructural

Tabla 9. Recomendaciones de diseño arquitectónico

Tabla 10. Recomendaciones de cumplimiento normativo

1. Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

El sector de la construcción es considerado, tanto a nivel nacional como internacional, como una de las actividades humanas que mayor impacto genera sobre el medio ambiente (IEA, 2020). Si bien en Chile no existen estadísticas oficiales sobre la materia, este sector es responsable de un 22,8% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del país, y se estima que consume cerca del 33% de la demanda total energética del país (CNP, 2019). Estos índices elevados se deben en gran medida, al uso casi exclusivo del hormigón armado para la construcción, que concentra cerca del 70% del total nacional (CChC, 2019). Este materia se caracteriza por requerir una gran cantidad de energía para su elaboración, transporte y uso, contempla grandes volúmenes de agua para aquello, además, genera una gran cantidad de residuos sólidos, que corresponden 56% generado por la industria (Conama, 2010) del total de tipos de residuos que se producen.

Es sector es esencial para el ámbito laboral y económico del país, ya que produce cerca del 8,5% del total de empleos disponibles (CChC, 2020). Sin embargo, desde un punto de vista económico, existe una falta de eficiencia importante de los procesos internos del rubro. En esta línea, un antecedente relevante, es que del total de edificaciones construidas anualmente, un 67% (INE, 2019^a) corresponden a edificaciones en altura, por lo que a este segmento de edificios, se le puede atribuir una carga importante de las externalidades ambientales producidas en el rubro de la construcción. Esto se debe al uso sostenido de técnicas de construcción tradicionales y poco innovadoras, se ha reflejado en el bajo crecimiento de sus índices de productividad, que entre los años 1988 y 2012, ha aumentado a penas un 0,1% (Banco Central, 2014). Este fenómeno que involucra externalidades medio ambientales negativas se debe a una falta de gestión e innovación, que se ha dejado de lado por suplir la constante demande de vivienda por el crecimiento de la población, y una falta general de conciencia colectiva con un desarrollo sustentable.

Dentro del sector de la edificación, del total de permisos de edificaciones autorizados, sobre el 76%, fue destinado a vivienda (INE, 2019b). Esta cifra, se contradice con el déficit habitacional actual, estimado en 739.603 hogares (CChC, 2017). Estas cifras se han mantenido estancadas en los últimos años por diversas razones, como el incremento de los precios de las viviendas, las tasas superiores al aumento del costo de vida (CEP, 2019), la exigencia de mayores estándares de constructibilidad, una menor disponibilidad habitacional, o el estancamiento de los niveles de productividad mencionados anteriormente.

Un actor importante del área residencial es el sector inmobiliario, como impulsor y agente económico en la densificación de las ciudades. Santiago al ser la capital de Chile, es la que propicia las tasas más altas de densificación (Contreras, 2011), que se materializa en construcciones principalmente de hormigón armado(70%) y madera(23%). Entre estas, las edificaciones de nueve o más pisos es un segmento comúnmente utilizado por el sector inmobiliario y se, concentran en un 70% (INE, 2019^a) en Santiago, El hormigón es el material principal de uso en estas construcciones en Chile, seguido por la madera, con un 20,8%, y 500.000 unidades aproximadamente de viviendas construidas en el año 2019 (INE, 2019^a). El desglose de las edificaciones que utilizan madera como material principal, muestra un aumento en el segmento de 1 y 2 pisos, luego una presencia casi inexistente el segmento de 3 a 6 pisos (INE, 2019b), y nula presencia en edificaciones de más altura. Esto se debe a que la utilización de la madera en altura requiere materiales, capacidades y niveles de prefabricación más complejos, para que se vuelva realmente competitivo respecto a los materiales usados actualmente.

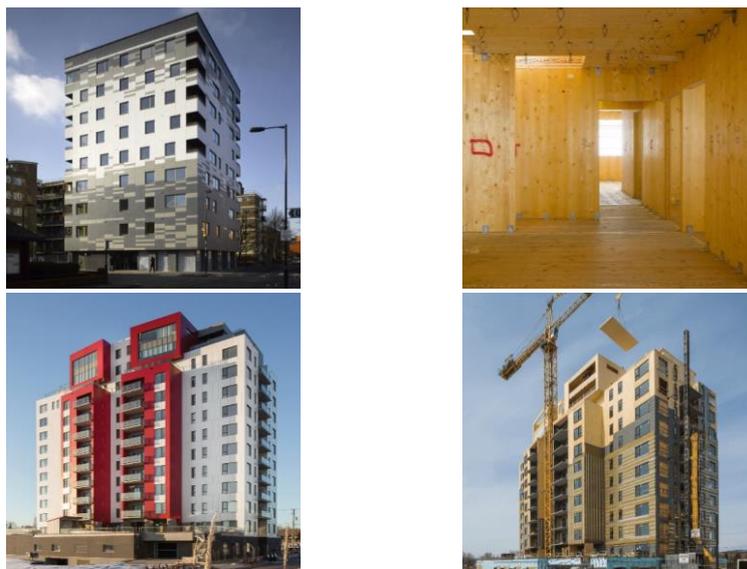
En relación a la proliferación del uso de la madera, otro actor clave es el sector forestal, en donde, Chile es considerado uno de los mayores productores de del mundo (INFOR, 2018).

Con una superficie de plantaciones cerca de 2,87 millones de hectáreas, que corresponden al 17,2% de la superficie de bosque existente, 1,95 millones de hectáreas de ellas son plantaciones de pino radiata, permitiendo la exportación de una gran parte a Norteamérica, Asia y Oceanía (FAO, 2019). Este tipo de madera se adjudica el 70% de madera industrial producida en el país, con certificación de manejo sustentable (Banco Mundial, 2020). El pino radiata es la materia principal en la producción de madera aserrada estructural clasificada y, a su par, se desarrollan en baja escala o de forma experimental la utilización los Eucalipto Nitens, Pino Oregón y otras especies nativas.

Respecto al comportamiento económico tendencial de precios de madera aserrada y trozas de pino radiata, cabe mencionar que hay una tendencia al alza, producto de la pandemia, debido al estancamiento inicial de la demanda y luego una fuerte reactivación, que no ocurrió con la con la misma eficiencia que tenía la industria antes de la crisis, afirmando la necesidad de mejorar la gestión y eficiencia. En esta línea, se propone incorporar valor agregado a nuevos productos madereros, apuntando al establecimiento de un mercado con una demanda estable de madera estructural aserrada (Kahler, 2020), mediante la incorporación de nuevas tecnologías que ya se vienen trabajando en economías internacionales.

En este contexto internacional, en los últimos veinte años se ha reflejado un auge en el uso de la madera de edificaciones en altura, aumentando su competitividad con otros materiales y la velocidad de divulgación de la materia. En Europa y Norte América, hay una industria establecida, con avances en la actualización de normas sobre el diseño estructural, resistencia al fuego, resistencia acústica y de aislamiento térmico. Hay un gran avance en metas y tratados internacionales que promueven este tipo de construcciones que ha permitido la realización de distintos referentes edificatorio. Algunos ejemplos son: el edificio Origine de 13 pisos en la ciudad de Quebec en Canadá (Figura 1ª), que permitió abrirle camino a nueva generación de edificios, al ser un modelo piloto para sus procedimientos, también está el edificio Mjøstårnet en Noruega de 18 pisos (Figura 1b), hay una serie de ejemplares en ciudades como Vancouver (18 pisos), Londres (9 pisos), entre otros.

Figura 1. Ejemplos de edificios a) Edificio Stadhaus b) Edificio Origine (Canadá) Fuente: (Nordic Structures, 2017) (Plataforma Arquitectura, 2009)



El tipo de madera más relevante en estas edificaciones el llamado “Madera Masiva”, caracterizado por grandes volúmenes de madera elaborada (Madera Laminada,

contralaminada, micro laminada). Estos productos son considerados de alta resistencia acercándose a materiales como el hormigón y el Acero, pero significativamente más liviana; de este conjunto de soluciones constructivas se desprenden distintas tipologías, como la madera laminada, micro laminada, y la madera contra laminada (MCL); Esta última ha tomado gran protagonismo internacional, y está compuesta por paneles formados por tablas de madera encoladas por capas y cruzadas entre ellas en números impares, que luego se prensan y forman paneles rígidos (WoodWorks, 2021). Esto genera un producto sustentable, con un alto nivel de prefabricación y que trabaja la compresión y tracción con un gran rendimiento, permitiendo generar una alternativa competitiva, frente a las distintas externalidades negativas que provocan los métodos constructivos tradicionales vigentes.

En Chile, la ausencia de la madera en segmentos de edificaciones mobiliarias en altura se debe a múltiples limitaciones, que comprenden desde temas sociales, de capacidad manufacturera y de regulación. En primer lugar, existe una concepción generalizada acerca de que las construcciones en madera se asocian a construcciones de baja calidad, junto a un arraigo cultural que tiende a construir con métodos tradicionales; En segundo lugar, en cuanto a la capacidad manufacturera, hay un desconocimiento generalizado de cómo se diseña y construye en alta calidad en madera, lo cual incentiva continuar utilizando los métodos clásicos. Falta experiencia de constructoras especializadas en construcciones prefabricadas de madera masiva y falta un diseño integral institucionalizado que armonice con los procesos industriales locales. Tampoco hay un canal de comunicación claro en cuanto a las capacidades de diseño y competencias específicas claras que deben tener las empresas manufactureras.

Además, hay una falta latente del producto de construcción maderero certificado, el cual tenga un respaldo científico en cuanto a sus cualidades de resistencia estructural, al fuego, y térmicas, para así evitar al máximo la incertidumbre de la utilización de estos nuevos materiales. En tercer lugar, hay una necesidad de una actualización regulatoria, la cual debe ser específica, considerando las particularidades de este material, ya que actualmente solo hay una relacionada al comportamiento del hormigón armado, en cuanto a su rigidez y que no es homologable a las características de la madera que tiene propiedades deferentes, como las asociadas a la flexibilidad. También, respecto a su regulación y el uso de madera masiva por parte de inmobiliarias, se presenta una situación que no cuenta con el respaldo normativo, por lo que se vuelve una opción más arriesgada.

Considerando los avances internacionales, es inevitable reconocer que es un material que en los próximos años va a tomar protagonismo, y puede ser un agente importante para llegar a las metas de carbono neutralidad planteadas por Chile para el año 2050. Con esto, el país debiera avanzar en los factores anteriormente mencionados.

La oportunidad de la construcción en altura con madera masiva en Chile recorre varias aristas, en su ámbito ambiental, operacional y de disponibilidad de recursos. En el ámbito ambiental, la madera es el único material, que posee emisiones negativas de dióxido de carbono (CO₂) negativas. Este material por cada metro cúbico almacena una tonelada de carbono biogénico (Growing Buildings. 2017). Posee un comportamiento térmico 4 veces mejor que el hormigón armado (FPInnovations, 2019), lo que impacta en la reducción de uso de materiales de aislación y una reducción de sistemas externos para llegar a condiciones ambientales óptimas. También se puede desmontar, reciclar y reutilizar. Además, genera menor contaminación acústica (WoodWorks, 2021), ya que sus procesos en obra son principalmente de montajes, evitando muchas maquinarias ruidosas, lo que se vuelve una oportunidad para construir en zonas con alta densificación y no generar molestias en el proceso. Finalmente, este material no tiene fase húmeda como el hormigón, lo que evita la utilización de grandes volúmenes de agua, y evita una etapa operacional que no requiere un gasto de tiempo, mano de obra y no produce gran cantidad de residuos sólidos por su moldaje; lo que reduce los tiempos de ejecución en un 30% (Skullestad, 2016). Sin embargo,

contempla una etapa más extensa en el diseño y prefabricación de los elementos, pero que, aun así, termina en un tiempo total invertido menor. Por último, Chile ofrece una gran capacidad forestal y de alta calidad, como se mencionó anteriormente. Y el pino-radiata, es el principal producto maderero certificado que posee características estructurales de gran comportamiento, para el uso en madera masiva.

1.2 Objetivos e Hipótesis de Trabajo

Objetivo General

Este trabajo tiene como objetivo aportar y promover, por medio de recomendaciones de diseño arquitectónico, el uso de sistemas constructivos en madera masiva, como una alternativa competitiva en la industrialización del sector residencial en altura. El enfoque de este trabajo es establecer criterios y lineamientos de diseño que puedan ser adoptados por arquitectos o constructores para cumplir con los requerimientos del sector inmobiliarios de Santiago.

Objetivos Específicos

- Identificar y evaluar los procesos más relevantes de la construcción con madera masiva que sean pertinentes para su implementación en la Región Metropolitana (RM).
- Integrar elementos prefabricados de madera masiva como alternativa para la construcción de edificios inmobiliarios, siguiendo lineamientos para un sistema constructivo altamente, estandarizado y replicable.
- Formular recomendaciones de diseño en madera masiva para cumplir con la normativa vigente y requerimientos de habitabilidad del sector inmobiliario.

Hipótesis

Se plantea como hipótesis de trabajo que es posible con los conocimientos y tecnología disponible hoy en día, diseñar y construir un edificio de mediana altura en madera masiva para la Región Metropolitana. Para aquello, se utiliza una metodología de homologación, la cual toma como referencia un edificio existente en hormigón armado y cambia su materialidad estructural a madera masiva. Esto se hace cumpliendo las normativas actuales, adaptando algunas normativas internacionales y siguiendo guías reconocidas internacionalmente que validen la correcta ejecución.

1.3 Resultados Esperados

Se espera confeccionar un paquete de recomendaciones, estructurales, arquitectónicas y de cumplimiento normativo, para losas y muros en madera masiva incluyendo aislación térmica, acústica y protección contra el fuego, que cuente con parámetros definidos de modificación, asociado a la tipología de edificaciones inmobiliarias residenciales de mediana altura.

1.4 Estructura metodológica

Este Seminario de investigación se estructura en torno a cuatro capítulos, como se puede apreciar en la tabla 1. El primer capítulo presenta un análisis bibliográfico y antecedentes de la problemática que presenta el sector de la construcción, edificación y la utilización de la madera en viviendas, que permite definir el campo de estudio y el vacío disciplinar que se presenta.

El segundo capítulo expone el estado del arte actual de la literatura de lo que concierne la madera masiva tanto en un ámbito nacional como internacional en torno a su utilización en edificaciones en altura.

El Tercer capítulo presenta la metodología, se analiza el caso de estudio, se definen los criterios que contempla la homologación del caso de estudio y, se exponen distintas consideraciones, que se desprenden del proceso de aplicación de la metodología, y de las entrevistas realizadas a expertos en el área, que fundamentan las recomendaciones posteriores.

El cuarto capítulo, presentan la recopilación y documentación de las recomendaciones o lineamientos obtenidas en el proceso de homologación de la edificación escogida como caso de estudio, y su eventual replicabilidad en otros proyectos que deseen utilizar este sistema constructivo. Todo esto con el fin de promover y aportar al vacío de conocimientos que existe en el área de edificación residencial inmobiliaria, respecto a la construcción prefabricada con madera masiva. Tabla 1. Estructura metodológica de investigación por capítulo

Capítulo	Objetivos	Herramientas
1. Introducción	<ul style="list-style-type: none"> Exponer el problema de investigación, los antecedentes que lo respaldan. 	<ul style="list-style-type: none"> Análisis bibliográfico, recopilación de datos y antecedentes, en relación con el área de la construcción, edificación, vivienda y utilización en madera.
2. Marco teórico	<ul style="list-style-type: none"> Recopilar el estado del arte en el ámbito nacional e internacional en relación con los conocimientos que tienen directa relación con uso de la madera masiva en edificaciones Identificar y evaluar los procesos más relevantes de la construcción con madera masiva en la Región Metropolitana, en sus diferentes procesos diseño, fabricación y construcción. 	<ul style="list-style-type: none"> Revisión, análisis crítico, interpretación y documentación de la revisión bibliográfica, guías de diseño internacional, Planos, especificaciones técnicas, detalles constructivos y normativa nacional e internacional.
3. Metodología	<ul style="list-style-type: none"> Analizar, el caso de estudio, definir criterios de aplicación de la metodología, aplicar validar las decisiones de homologación, y exponer antecedentes que respalden las recomendaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Planos arquitectónicos y constructivos del edificio en estudio. Realizar entrevista/asesoría a especialistas de áreas en torno a la construcción en madera masiva. Recopilar información del proceso.
4. Recomendaciones de Diseño	<ul style="list-style-type: none"> Realizar recomendaciones de diseño fundamentados para la construcción de edificios residenciales en altura. 	<ul style="list-style-type: none"> Elaboración de documentos de recomendaciones de diseño, replicable y estandarizado.
5. Conclusiones		

2. Marco Teórico

2.1 Introducción

Este capítulo presenta una revisión sobre el estado del arte en la literatura nacional e internacional sobre la construcción en madera masiva, abarcando sus fases de diseño, fabricación y construcción. El objetivo es recopilar información específica relacionada con edificaciones en altura, desde un aspecto técnico, hasta aspectos normativos para la implementación en Santiago. El capítulo se divide en cuatro partes. El primero es una revisión de carácter técnico acerca de la construcción madera masiva. El segundo es una revisión internacional nuevas tecnologías utilizadas en edificaciones en altura con madera masiva. Tercero es una revisión al estado de construcción en madera masiva nacional. Y el último es una revisión a los requerimientos inmobiliarios asociados a las construcciones de edificaciones de mediana altura.

2.2 Construcción con Madera Masiva

La Madera masiva es un sistema constructivo caracterizado por la utilización de la madera como material principal, se caracteriza por utilizar piezas gruesas y prensadas que crean elementos resistentes y estructurales. Son considerados de alta resistencia como el hormigón y el acero, pero significativamente más liviana; de este conjunto de soluciones constructivas se desprenden distintas tipologías, como principales actores encontramos la A) madera laminada, B) micro laminada, y por último la madera C) contra laminada (MCL).

El origen del producto conocido como Cross Laminated Timber (CLT) y en español madera contra laminada (MCL), se forma casi como una evolución lógica de las estructuras de madera laminada, se remonta a principio de la década de 1990, presentándose en Alemania y Austria; en este último se produjo el mayor desarrollo, debido a una necesidad de incentivar el consumo de la madera, y satisfacer las necesidades del momento. En un principio nace como una alternativa para la construcción, pero este no se consolida hasta principios de los años 2000 hasta que logra convertirse en un producto del mercado de masas. Produciéndose una fuerte expansión, implementándose en centro Europa y en otros países con tradición en construcciones en madera como Canadá, Estados Unidos y Australia. A pesar de la expansión, la producción se concentra en más del 80% en centro Europa. La proyección para la producción de Madera Masiva, según el Instituto de la Madera de la universidad de Graz en 2010, estimaba que la producción de la madera contralaminada en Europa tendría un crecimiento constante y que, para el 2015, se llegaría a una cuota de producción anual de 600.000 m³, esta cifra fue alcanzada y superada en 2016 alcanzando 680.000 m³ y estimándose su aumento a 1.200.000 m³ para el año 2020 (Scarano, 2019).

Hoy en día, la masificación de los distintos productos de madera masiva sigue perfeccionándose a través de los distintos agentes que participan, desde la extracción de la materia prima, la producción, el diseño y la construcción. El gran impulso que ha tenido la madera masiva se debe a varios factores, como la preocupación por el impacto del rubro de la construcción sobre el medio ambiente, la búsqueda de nuevas alternativas para una construcción más industrializada y eficiente, entre otros, lo que permite ser un material con variabilidad de usos.

Respecto al impacto medio ambiental, este es uno de los principales argumentos que respaldan el uso de este material, las externalidades medio ambientales positivas producto de la utilización de este material, en comparación al uso de materiales y técnicas constructivas tradicionales, como el Hormigón Armado, el cual la madera masiva se sitúa como una alternativa sustentable frente a los materiales considerados de alta resistencia.

Las ventajas principales que se asocian al uso de este material son:

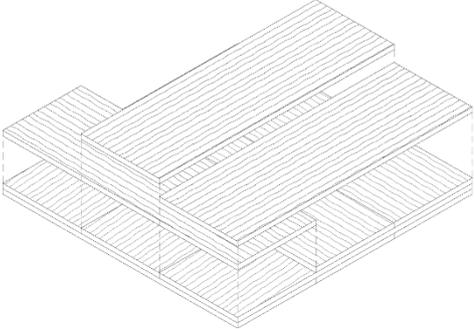
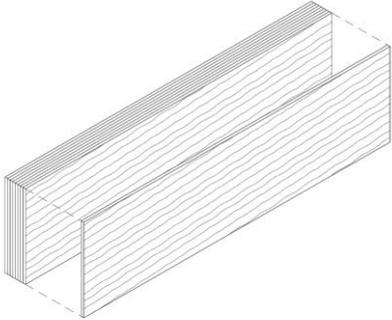
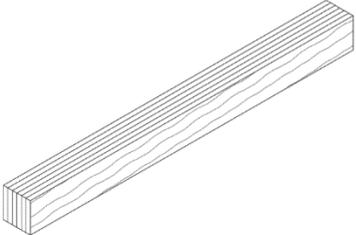
- **La captura de CO₂:** La madera es el único material utilizado en la construcción que ayuda a reducir el CO₂ de la atmosfera, durante la vida de los árboles estos absorben CO₂, el cual queda almacenado en sus paredes celulares, Un metro Cubico de madera puede almacenar entre 1 y 1,6 toneladas de CO₂ (Growing Buildings, 2017)
- **Material Renovable:** La madera es material renovable, por un lado, su disponibilidad viene dada y garantizada mediante la producción y su manejo sustentable, hay certificaciones que aseguran una producción sustentable como se detalla en la sección de Chile. Por otro lado, la madera nos permite su reutilización, como es un material que se trabaja en seco mediante la unión de piezas, una edificación ya construida puede ser desmontada y las propiedades estructurales del material no se pierden, permitiendo nuevos usos.
- **Comportamiento térmico:** Su comportamiento térmico es 4 veces mejor que el Hormigón Armado, por lo que permite la disminución de materiales externos para alcanzar los requerimientos normativos, y disminución de la utilización de elementos externos tanto de calefacción o aire acondicionado para alcanzar los niveles óptimos de habitabilidad.
- **Producción limpia y eficiente:** Desde sus procesos de extracción y manufactura este material requiere menos energía en comparación a la elaboración del hormigón y acero. Además, el avance en tecnología ha permitido aprovechar los residuos sólidos en la factora en la formación de paneles reconstituidos. (INFOR, 2019)
- **Menor tiempo de construcción:** Esta técnica al constituirse en base al montaje de piezas prefabricadas, el tiempo in situ de construcción se reduce solamente al montaje de las piezas y terminaciones, por lo que genera menos contaminación acústica, evitando una gran cantidad de camiones y otras maquinarias asociadas. Se estima que los tiempos de ejecución se reducen cerca de un 30% (Skullestad, 2016)

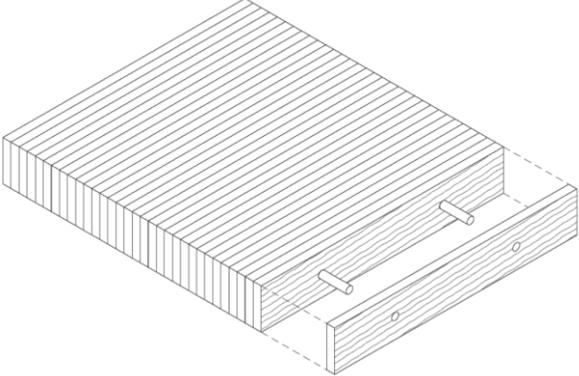
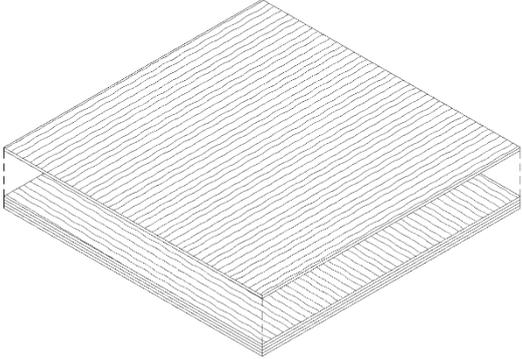
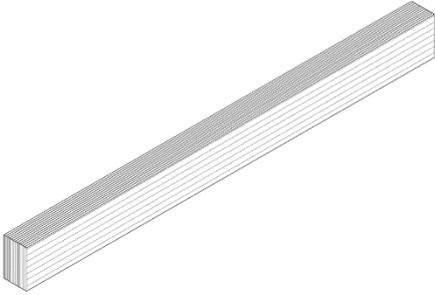
2.2.1 Sistema Constructivo

El tipo de construcciones que se realizan con este material es variado, desde residencias unifamiliares, edificios corporativos, edificios inmobiliarios tanto de oficinas como residenciales, también ha sido utilizado en hospitales y recintos educacionales, debido a sus propiedades biofílicas que mejoran la calidad de habitabilidad de estas edificaciones, que es una de las externalidades positivas que se desprender del uso de la madera masiva como elemento principal.

Los sistemas constructivos en madera masiva pueden abarcar la utilización de un material, o combinación de distintos productos de madera masiva. Esta sección se dividirá en tres partes. La primera expondrá los distintos componentes que abarca la madera masiva. La Segunda, expondrá las combinaciones utilizadas en estructuras hibridas con productos de madera masiva y otros complementarios. La tercera mostrara, en líneas generales diferentes tipologías de detalles constructivo. El grupo de componentes en madera masiva, se indican en la siguiente Tabla 2

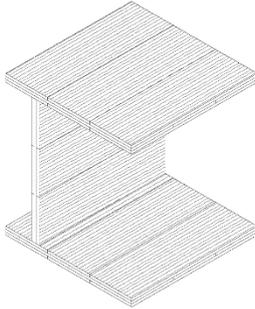
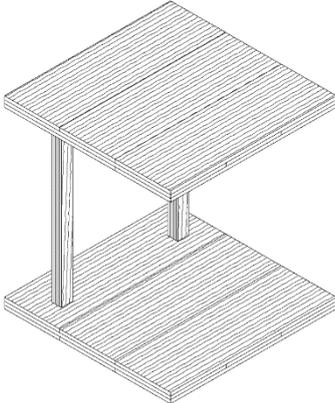
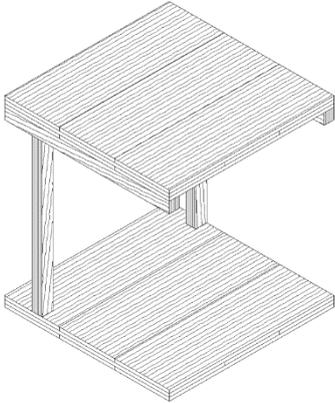
Tabla 2. Componentes Madera Masiva

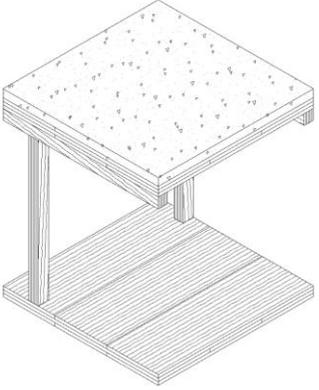
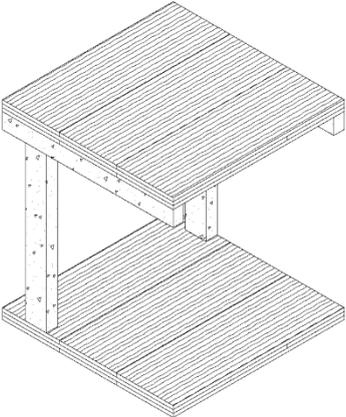
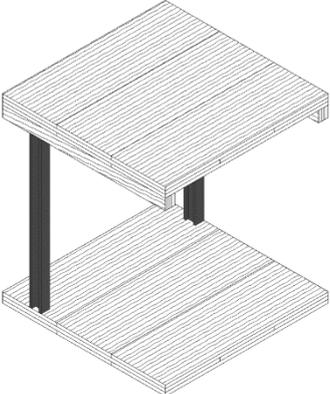
Nombre	Forma	Esquema
Madera Contralaminada (MCL) o (CLT)	Panel	
Madera Laminada Encolada (MLE)	Panel	
	Pilar	
	Viga	

<p>Madera Laminada Tarugada (MLT)</p>	<p>Panel</p>	
<p>Madera Contrachapada (MCC)</p>	<p>Panel</p>	
<p>Madera de Chapa Laminada (LVL)</p>	<p>Pilar</p>	
	<p>Viga</p>	

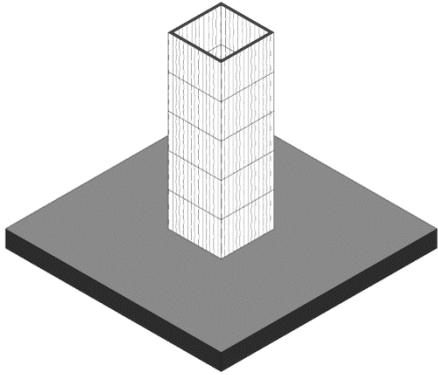
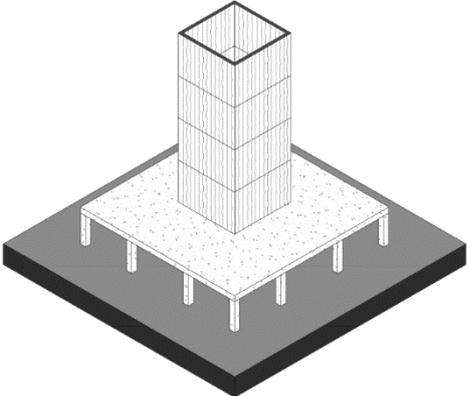
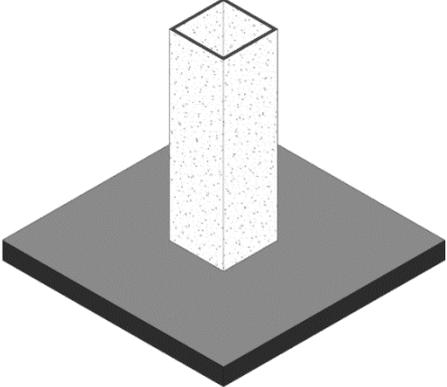
Para Constituir el Sistema constructivo, se presentan en la tabla 3, las diferentes combinaciones de componentes, para formar el sistema estructural, en general, la elección de estos se debe a los requerimientos programáticos, restricciones normativas locales y disponibilidad de recursos locales, se muestra como en distintos casos se pueden utilizar uno de los productos en madera masiva o combinaciones híbridas que nos permiten ampliar nuestras posibilidades de diseño.

Tabla 3. Sistemas constructivos puros y híbridos

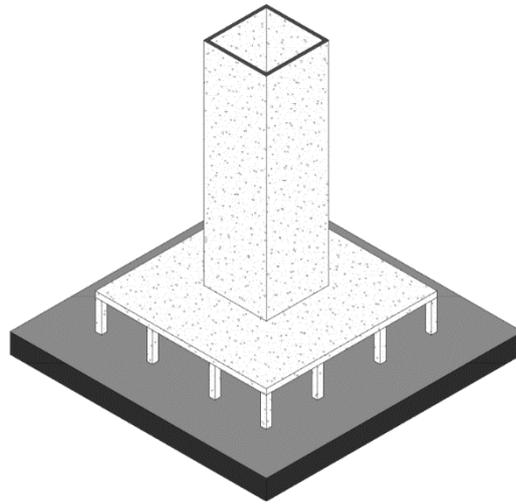
Composición del Sistema	Esquema
<p>Muros: MCL o CLT</p> <p>Losa: MCL o CLT</p>	 <p>The diagram shows a cross-section of a hybrid construction system. It features a top slab and a bottom slab, both made of wood panels (MCL or CLT). The two slabs are connected by two vertical wall panels (MCL or CLT) that run through the height of the structure, forming a rectangular frame.</p>
<p>Pilar: MLE</p> <p>Losa: MCL o CLT</p>	 <p>The diagram shows a cross-section of a hybrid construction system. It consists of a top slab made of wood panels (MCL or CLT) supported by a single vertical post (MLE). Below the slab, there is a base slab also made of wood panels (MCL or CLT).</p>
<p>Pilar: MLE</p> <p>Viga: MLE</p> <p>Losa: MCL o CLT</p>	 <p>The diagram shows a cross-section of a hybrid construction system. It features a top slab made of wood panels (MCL or CLT) supported by a vertical post (MLE). A horizontal beam (MLE) is attached to the post and extends across the width of the slab. Below the slab, there is a base slab made of wood panels (MCL or CLT).</p>

<p>Pilar: MLE o LVL</p> <p>Viga: MLE o LVL</p> <p>Losa: MCL o CLT + HA</p>	
<p>Pilar: HA</p> <p>Viga: HA</p> <p>Losa: MCL o CLT</p>	
<p>Pilar: AC (Acero)</p> <p>Viga: MLE</p> <p>Losa: MCL o CLT</p>	
<p>Pilar: AC (Acero)</p> <p>Viga: AC</p> <p>Losa: MCL o CLT</p>	

Otro aspecto de la construcción híbridas, es la incorporación de núcleos o podio (primer piso) de hormigón armado, las combinaciones presentadas en la tabla XX, muestran las diferentes combinaciones utilizadas.

Núcleo CLT	
Núcleo CLT + Podio H.A	
Núcleo de H.A	

Núcleo de H.A + Podio de H.A



2.2.2 Detalles constructivos

La construcción con madera contralaminada contempla técnicas constructivas de carácter general, entre estas se presentan; las uniones entre paneles de CLT, que en el caso de las losas se reitera su uso en los diferentes sistemas constructivos, y también las uniones entre pilar-viga, por lo que esta sección se acotara, abordando uniones del Sistema Puro CLT y del sistema que utiliza pilar, viga de MLE o LVL y losas de CLT/HA.

Las **uniones de Continuidad** de losas de CLT entre paneles que se sitúan en dirección longitudinal, su diseño requiere resistir el corte en el plano y la flexión fuera del plano. En el caso de la losa, esta unión debe ser capaz de transferir sus cargas en el diafragma y mantener el sistema resistente de fuerzas laterales. Como se puede ver en la Figura 2, se muestran distintas alternativas, de unión entre losas.

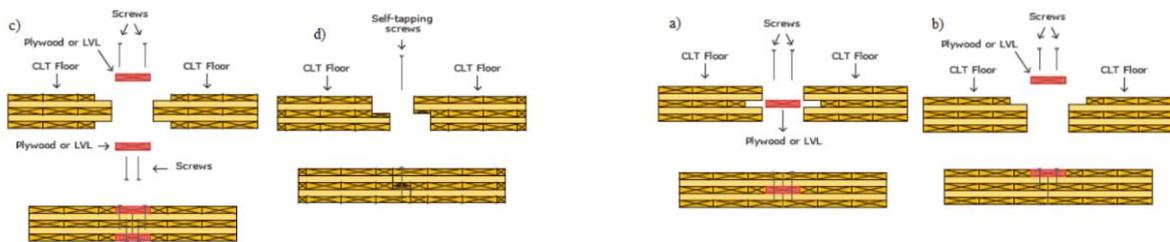
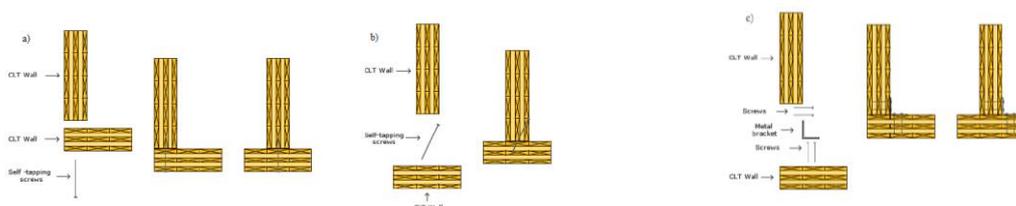


Figura 2: Uniones típicas entre paneles: a) Internal Spline, b) Single Surface Spline, c) Double Surface Spline, d) Half-Lapped Joint. (FPInnovations, 2019)

Las **uniones perpendiculares** de paneles muro-muro y muro – losa perpendicular, se utilizan generalmente uniones metálicas presentadas en la sección siguiente, por otro lado, se presentan en la figura 3, tres métodos utilizados según el diseño estructural que se utilice, una



de las consideraciones que se utiliza en el método b, es la utilización de tornillos colocados en ángulo, que ayudan a optimizar el rendimiento de la unión.

Figura 3: Unión perpendicular entre paneles (FPInnovations, 2019)

Conectores Metálicos

Los **Conectores metálicos** se utilizan para diferentes composiciones de muros, los cuales requieren distintos tipos de herrajes, tornillos y/o clavos. Los conectores metálicos se dividen principalmente en dos categorías. El primero llamado Angle bracket (AB) caracterizado por ser una pieza metálica en forma de Angulo, diseñado para resistir los esfuerzos cortantes que se ocasionan en la estructura, sin despreciar su capacidad frente a cargas axiales y el segundo llamado Hold-down (HB) es una pieza metálica diseñada para resistir grandes cargas axiales, principalmente la tracción, evitando el levantamiento y volcamiento de paneles.



Figura 4. A) Hold-Down HTT4 (Simpson Strong-Tie). B) Angle Bracket ABR255 (Simpson Strong-Tie)

En las **uniones pilar - viga**, se utilizan principalmente, conectores ocultos dentro de la madera, esto se debe a que por un lado se protege a la unión de acero, que tiene menos resistencia al fuego que la madera, y por otro se resguarda su función estética, si se desea utilizar la Viga o Columna como terminación. En la Figura 5, se puede apreciar un tipo de unión oculta, la cual es de fácil montaje.

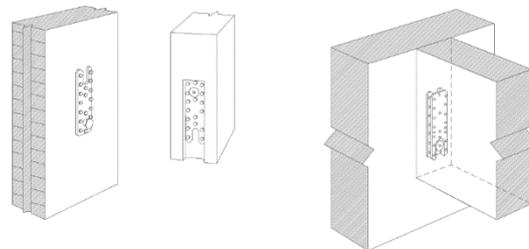


Figura 5. Unión CBH, del proveedor Simpsons Strong-tie

En la **unión Pilar – Losa**, generalmente, se utilizan uniones que transfieran las cargas directamente a los pilares inferiores, evitando provocar una compresión en la losa. En la figura 6, se pueden apreciar dos tipos de uniones utilizada en sistemas híbridos.

Composición de paneles

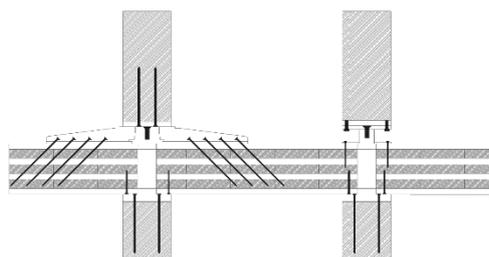


Figura 6: Unión Spyder y Unión Pilar del proveedor Rothoblass

Un **detalle genérico de paneles de CLT**, contempla la utilización de diferentes elementos complementarios, para satisfacer los diferentes requerimientos de habitabilidad, a continuación, se presentan dos composiciones de paneles para muro y losa de carácter general, ya que la composición de cada elemento depende de los requerimientos particulares de cada proyecto.

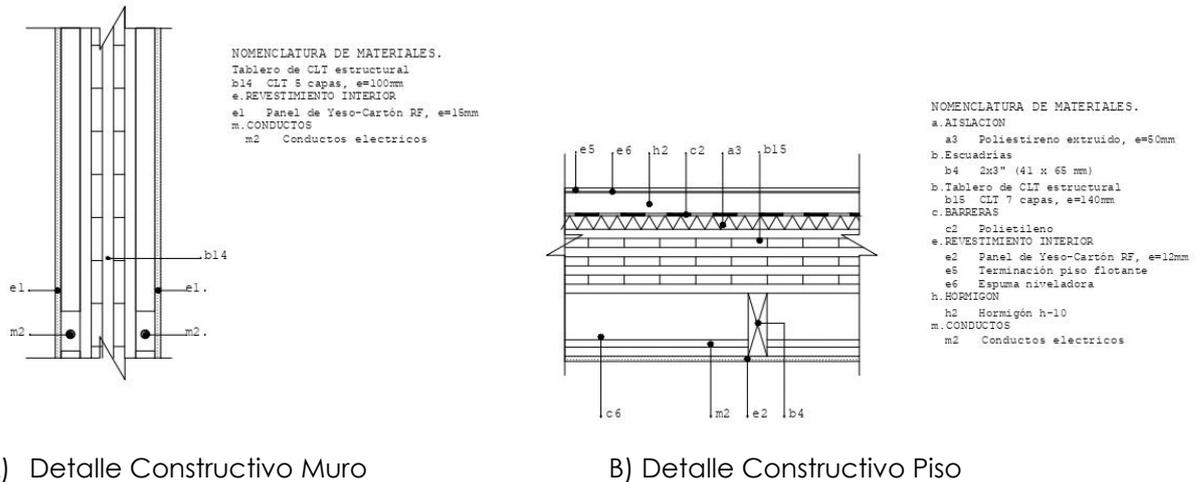


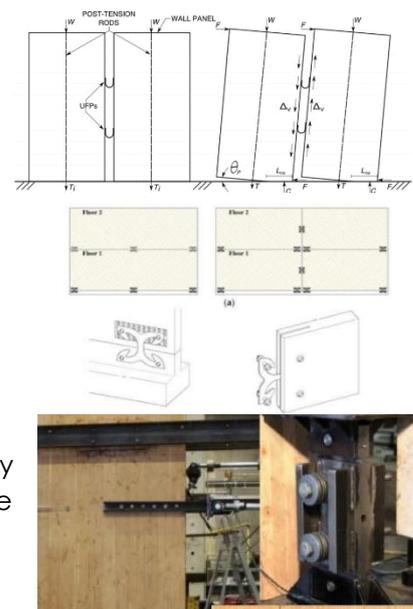
Figura 7. Detalle constructivo genérico (Fuente Polo Madera)

2.3 Eclósión de Nuevas Tecnologías Constructivas

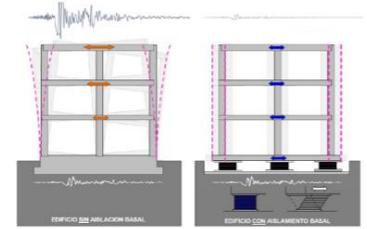
Actualmente en el ámbito internacional hay nuevas tecnologías y/o técnicas constructivas que están tomando relevancia entorno a solucionar distintas problemáticas que han surgido con la experiencia de edificios ya construidos, en esta sección se introducirán algunas que se consideren relevantes para el caso de estudio.

Soluciones Diseño antisísmico

- **Muros Oscilantes de CLT Post tensando:** tecnología probada el 2017 en un modelo de dos pisos que busca integrar al diseño un sistema de muros oscilantes postensados de madera contralaminada, unidos mediante diferentes conexiones metálicas, hoy en día se realizan estudios en Chile con el sistema marco plataforma (Wilson, 2019)
- **Unión Bracket "tipo X":** el cual es un sistema disipativo que poseen una mayor ductilidad y actúan como fusibles durante movimientos sísmicos.(Monsalve, 2019)
- **Disipador Friccional:** Estos buscan reemplazar por completo las uniones convencionales, utilizando una conexión angular que funciona como llave de corte, y disipa la energía dentro del mismo mediante el roce que genera entre sus partes (Monsalve, 2019)



- **Aislación Basal:** técnica basada en desacoplar una estructura del piso, colocando un mecanismo entre la base del edificio y la fundación, esto permite más flexibilidad en la dirección lateral, disminuyendo las solicitaciones sísmicas. (Monsalve, 2019)



2.3.1 Consideraciones y tecnologías de Acondicionamiento

Diseño térmico:

- Para el diseño térmico cabe recordar que los paneles de CLT tienen un comportamiento térmico 4 veces mejor que el H.A (WoodWorks, 2021). Según un estudio realizado por la Universidad de Santiago llamado "SOLUCIONES PARA AISLACIÓN TÉRMICA Y ACÚSTICA DE UN EDIFICIO DE VIVIENDA SOCIAL EN CLT", (Gonzales & otros, 2019) se menciona, que sumando un listonado de madera más una placa de yeso cartón se cumpliría con la normativa, pero que las exigencias acústico exigiría más materiales lo que beneficiaría de igual manera el comportamiento térmico.

Diseño acústico: Para controlar el ruido y las vibraciones que se producen dentro de la estructura y a través de ella hay varios factores que considerar:

- Para el sonido directo o del aire la utilización de productos como yeso cartón como revestimiento del CLT deberían cumplir con los requerimientos, si es necesario se puede incluir espuma de caucho o una capa con listonado de madera con aislación.
- Para el sonido transmitido a través de los materiales hay que aumentar su masa, para esto hay principalmente dos soluciones, una es la utilización de una losa de hormigón ligero u otra masa sobre un aislamiento acústico con una base sobre el CLT. La otra opción, es una solución "seca", mediante la utilización de un panel de madera aglomerada, con un listonado con aislación seca entremedio. Por otro lado, es importante que las estructuras de la pared y el piso deben estar separadas, esto se puede solucionar aplicando bandas elásticas entre la estructura y uniones metálicas. (Ahvenainen & Sousa, 2016)

Diseño a la resistencia al fuego:

- Para otorgar resistencia al fuego hay tres principios proyectuales que considerar; 1) Madera Expuesta 2) Madera Semi encapsulada 3) Madera Completamente Encapsulada, estas dependen principalmente del reglamento normativo y el uso de la edificación, aun así para utilizar la madera expuesta, como es común en construcciones que utilizan madera masiva, hay pinturas retardantes, pero requieren una aplicación cada ciertos años, otra opción es agregarle otra capa de madera, considerada de sacrificio para que se carbonice y así proteger el comportamiento estructural. Otro punto para considerar son las uniones metálicas lo que se recomienda que sean uniones no visibles o protegidas. (Ahvenainen & Sousa, 2016)

2.4 Manufactura Nacional

Esta sección revisara un levantamiento de las capacidades de provisionamiento de materiales, la construcción inmobiliaria de Santiago y las restricciones que presenta el ámbito local para la incorporación de este sistema constructivo.

Chile se destaca por ser un país que explota y exporta sus materias primas, una de ellas es su sector silvícola, en este se concentra la extracción de pulpa, tableros y madera aserrada.

La industria de madera estructural se basa principalmente, de trozas de Pino Radiata, según cifras del 2017 el consumo de esta corresponde al 67% del consumo industrial, equivalente a 30,6 millones de metros cúbicos sin corteza, del total de plantaciones certificadas las de pino radiata corresponde a 1.3 millones de hectáreas concentradas en las regiones de la Araucanía, Maule y Biobío (INFOR, 2018)

En Chile, hay empresas dedicadas al rubro silvícola de variados tamaños, pero cabe mencionar dos empresas que son las que tienen mayor participación en este sector económico, la cual es Arauco y CMPC, empresas que tienen la capacidad de volumen y ofrecen productos de materia prima certificados o que se podrían considerar confiables para la utilización en sistemas constructivos de madera masiva.

Cabe mencionar que, también hay más empresas que ofrecen los mismos servicios, y es importante que cumplan con certificaciones nacionales e internacionales, que certifican el origen de la madera y el correcto manejo del bosque, una de estas certificaciones es:

FSC: Organización global, sin fines de lucro dedicada al manejo forestal responsable, socialmente beneficioso y económicamente viable, asegurando trazabilidad del producto vendido y asegurando que la tasa de plantación supere siempre la de cosecha (FSC Chile, 2015)

En el caso de la certificación de la madera en Chile no existe un rotulado que especifique la calidad estructural, de humedad y otros antecedentes, solo hay laboratorios acreditados que entregan informes de ensayo a los respectivos aserraderos, lo que se vuelve una carencia en el sistema, aun así, ya se está trabajando en un rotulado que especifique las condiciones específicas de cada pieza de madera.

Por otro lado, existen empresas dedicadas a la manufactura de productos elaborados de madera ingeniería como:

- NiuForm (www.niuform.cl)
- Crulam (www.crulamm.cl)
- Ingelam (www.ingelam.cl)

2.5 Requerimientos Inmobiliarios

Los requerimientos arquitectónicos se basan principalmente en dos categorías. Por un lado, está la categoría asociada a las necesidades del mercado, respecto a la demanda de usuarios tipo, los costos, tipo de Familia, tamaño de vivienda. Por otro lado, están los requerimientos inmobiliarios respecto a la habitabilidad, que sumado a la situación de COVID-19, se repensaron algunos espacios del hogar, por lo que tendencias como, áreas integradas (cocina americana), Naturaleza en el hogar, Espacios mixtos, expansión al exterior, toman relevancia en la actualidad.

Respecto al uso de la madera masiva frente a los requerimientos mencionados, posee características como se mencionó en el texto, como sus propiedades biofílicas, que beneficia la habitabilidad de estos espacios interiores, posee cualidades térmicas más beneficiosas que materiales tradicionales, entre otras características. Otro punto importante es su condición como almacenamiento de CO₂, resguardando todo el carbono capturado en la vida de los árboles utilizados. Desde el aspecto económico, la madera masiva se caracteriza por requerir un alto grado de industrialización y prefabricación, lo que le permitiría ser una alternativa como material para el sector inmobiliario, para incrementar la productividad del rubro. Aun así, para posicionarse de manera estable esta posibilidad de construcción debe cumplir con las diferentes normativas chilenas.

2.4.1 Requerimientos Normativos

Uno de los mayores problemas que se presentan en Chile, para la implementación de la madera masiva, es la inexistencia de normativas específica asociada al uso de madera masiva en edificaciones, esto se debe a que la normativa chilena es prescriptiva y reactiva, lo que significa que su foco está asociado más a la forma que en el resultado, y reactiva debido a que esta se va adecuando o modificando después de algún suceso que demuestre que tiene que ser cambiada, por esto la normativa castiga de gran manera la introducción de un nuevos materiales. Por otro lado, en los países más desarrollados en estos temas, están las normativas basadas en el desempeño, la cual su foco este puesto en resultado más que en la forma, esto permite crear un contexto más favorable para la innovación. Igualmente, la normativa actual contiene parámetros los cuales debemos considerar para la construcción de edificaciones, las cuales se presentarán a continuación.

El cuerpo normativo en Chile para la construcción de edificios se compone a través del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) que impone requisitos a través de la Ley General de Construcción y Urbanismo (LGUC), que a su vez se aplica a través de la Ordenanza General de Urbanismo y construcciones (OGUC). En las próximas secciones se explicitarán las normativas asociadas a la Ubicación de Santiago de Chile, que deben cumplir las edificaciones en madera y se detallara cuando la normativa nacional no es suficiente o no contemple aspecto que así lo requieran (Fierro, 2020)

OGUC

2.4.2 Acondicionamiento Térmico

Las exigencias térmicas están asociadas a través de la Transmitancia máxima (U) o resistencia total mínima (R_t) a los elementos de la envolvente de un edificio. En otros términos, los entrepisos que funcionan como separadores entre unidades, no están incluidos entre las restricciones, debido a que son considerados dentro del edificio, suponiendo un comportamiento adiabático del sistema.

Se acotarán los datos en referencia al caso de Estudio utilizado (Anexo A)

Zona térmica: 3 – Santiago

Tabla 4: Exigencias térmicas O.G.U.C.

ZONA	TECHUMBRE	TECHUMBRE	MUROS	MUROS	PISOS VENTILADOS	PISOS VENTILADOS
	U W/m ² K	R_t m ² K/W	U W/m ² K	R_t m ² K/W	U W/m ² K	R_t m ² K/W
3	0,47	2,13	1,9	0,53	0,7	1,43

2.4.3 Aislación Acústica

Las exigencias acústicas abarcan los elementos separadores entre unidades, estos se diferencian entre elementos horizontales y verticales. Por lo que las exigencias acústicas aplican para losas, muros y entrepisos que separan dos viviendas. En estos elementos horizontales se aplican dos exigencias de aislamiento acústico.

- Aislamiento de ruido acústico, se debe asegurar que los elementos como conjuntos entre los pisos o unidades aislé a lo menos 45 dB de ruido aéreo, denominado el índice de reducción mínima

- Aislamiento de ruido de impacto, se debe asegurar que el conjunto de elementos que forman el entrepiso no transmita una presión superior a 75 dB de impacto de un piso a otro, denominado el nivel de presión acústica normalizado máximo

La acreditación para que los elementos cumplan con las exigencias establecidas, existe un Listado Oficial de Soluciones para Aislamiento Acústico, 2014, aprobadas por el MINVU de acuerdo con ensayos realizados. (OGUC, 2016)

En caso de que se requiera utilizar una nueva solución, se puede hacer una homologación a una ya existente, si no es posible, se debe hacer la acreditación a través de ensayos normados por la NCh2785 "acústica – Medición de aislación acústica en construcciones y elementos de la construcción – mediciones en laboratorio de la aislación", la utilización del laboratorio depende de si el elemento ya está construido en terreno o si se puede construir una probeta previa a su instalación.

2.4.4 Resistencia al fuego

Las exigencias para la resistencia al fuego (RF), se categorizan dependiendo de los elementos del edificio. Los edificios habitacionales se categorizan según el número de pisos que tenga, edificio tipo "d" (1 – 2 pisos), tipo c (3 – 4 pisos), tipo d (5 pisos) o tipo "a" (6 o más pisos). Luego dependiendo de la función del elemento (Tabla 1) propicia una exigencia específica.

Se acotarán los datos en referencia al caso de Estudio utilizado (Anexo A)

Tabla 5: Resistencia al Fuego O.G.U.C.

Elementos de construcción									
Tipo	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
a	F-180	F-120	F-120	F-120	F-120	F-30	F-60	F-120	F-60

- (1) Muros cortafuego
- (2) Muros zona vertical de seguridad y caja de escalera
- (3) Muros caja ascensores
- (4) Muros divisorios entre unidades (hasta la cubierta)
- (5) Elementos soportantes verticales
- (6) Muros no soportantes y tabiques Elementos verticales y horizontales
- (7) Escaleras Elementos horizontales:
- (8) Elementos soportantes horizontales
- (9) Techumbre incluido cielo falso

La nomenclatura de la tabla se expresa de la siguiente manera, que un elemento tenga una resistencia F – "N", significa que se debe garantizar por al menos "N" minutos, la resistencia al fuego de dicho elemento, sin que pierda sus capacidades estructurales y siga soportando las cargas.

Dado que estos requisitos aparecen en la O.G.U.C, es necesario acreditar que la elección de elementos cumple, con los estándares establecidos, para posteriormente poder recibir el permiso de edificación. En el caso de la resistencia al fuego se pueden obtener de dos formas:

1. La acreditación para que los elementos cumplan con las exigencias establecidas, existe un Listado Oficial de Comportamiento al fuego de Elementos y Componentes de la construcción, 2014, aprobadas por el MINVU de acuerdo con ensayos realizados. Para realizar una nueva solución se debe homologar una ya existente en el listado, pero la creada debe ser más favorable que la del listado y, debe ser firmada por un laboratorio certificado.
2. Si no se puede realizar una homologación con el listado oficial, la normativa actual no tiene otra alternativa que realizar un ensayo de laboratorio que demuestre la resistencia

exigida. El procedimiento para realizar el ensayo esta normado por la NCh 935/1 "Ensayo de resistencia al fuego – Elementos de construcción General".

2.4.5 Diseño Estructural

En Chile la innovación en materia de madera, no se ha visto impulsada por el ente regulador, el cual es el encargado de cohesionar protocolos, establecer métodos y procesos que regularizan la materia y le otorgan confianza al que desee utilizar este método innovador.

Para la modelación de una estructura de madera masiva, y su pre dimensionado es importante entender, cuáles son las normativas existentes que nos permiten acercarnos a una correcta elección de los elementos de construcción, por otro lado, también es necesario identificar cuáles son los aspectos en que hoy en día dificultan el cálculo para este tipo de estructuras, cabe mencionar para el tipo de proyecto el cual se abracara, se vuelve indispensable un calculista que avale las materialidades y particularidades del mismo proyecto.

Las normas relacionadas a la construcción en madera de Pino Radiata son las siguientes:

- a) NCh 1198 – 2014 "Construcción en madera – Cálculo"
- b) NCh 2150 "Madera laminada encolada – Clasificación mecánica y visual Pino radiata"
- c) NCh 2149 "Madera – Madera aserrada – Determinación del módulo de elasticidad en flexión – Método de ensayo no destructivo"
- d) NCh 2165 "Tensiones admisibles madera laminada encolada estructural de Pino Radiata"
- e) NCh 1207 "Pino Radiata – Clasificación visual para uso estructural – Especificaciones de los grados de calidad"

Las normas relacionadas al Diseño estructural

- a) NCh 433 – 2009 "Diseño sísmico de edificios"
- b) NCh 1537 - 2009 "Cargas Permanentes y Cargas de Uso"
- c) NCh 3171 – 2010 "Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas"

Vacíos en la normativa

Uno de los problemas que podemos evidenciar, es que no existe conocimiento suficiente para categorizar a los paneles de CLT en la norma NCh433of96, específicamente en el capítulo 5, la cual trata sobre los valores de modificación de la respuesta estructural, ya que en la tabla 5.1 se presentan los parámetros R, que categorizan automáticamente a los muros CLT en "cualquier tipo de estructuración o material que no pueda ser clasificado en alguna de las categorías anteriores", valor igual a dos

Esto significa que la estructura propuesta no está diseñada para disipar energía, y se aumentan las cargas sísmicas a través del coeficiente sísmico (Hernández, 2016). Otro punto para considerar son las distintas aperturas de muros. El estudio realizado (Dujic, 2006) ha llegado a la conclusión de que las aberturas con una superficie total de hasta el 30% de toda la superficie de la pared no influyen de manera significativa en la capacidad de carga de la pared. La rigidez en tales casos se reduce aproximadamente al 50%.

2.6 Conclusión

El marco teórico presentado, expone el estado del arte de la madera masiva desde las características propias del sistema constructivo, el cual más que solo la elección de un

material es una metodología de trabajo, que contempla un alto nivel de prefabricación y por ende una etapa de diseño más larga, con un alto control temprano de las distintas variables de diseño arquitectónico, estructural, constructivo y de acondicionamiento. También se destaca su amplia variedad de externalidades medioambientales positivas, como una alternativa viable respecto a la construcción tradicional, que se distingue por el uso de Hormigón y Acero. De igual manera se manifiesta la importancia de las estructuras híbridas, que utilizan distintos productos de madera masiva o la combinación con materiales tradicionales, que permiten una mayor diversidad y variabilidad proyectual. Luego de abarcar las distintas opciones y configuraciones espaciales que ofrece la madera masiva, se destacan los diferentes conocimientos de carácter común que se han ido asentando en variadas edificaciones, también nuevas tecnologías se han ido incorporando hoy en día demandadas por los distintos requerimientos solicitados por distintos territorios. Chile viene aproximándose desde hace varios años, como un potencial referente en construcciones de madera masiva gracias a su potencial silvícola, pero que sigue teniendo ciertas trabas desde el ente regulador, para generar una atmósfera con menos incertidumbres para que actores inmobiliarios y otros interesados puedan optar por la madera masiva como un metodología constructiva, rentable, segura y avalada por el ente regulador local.

3. Metodología

3.1 Introducción

Este capítulo presenta la aplicación de la metodología de homologación propuesta para un caso de estudio específico. El objetivo de esta metodología es aproximarse al mercado inmobiliaria actual, de una edificación residencial perteneciente al tramo socio económico medio-alto. En el desarrollo de este capítulo, En primer lugar, se presentará el caso de estudio, exponiendo sus diferentes características tanto estructurales y arquitectónicas. En segundo lugar, se definirán los distintos criterios de homologación que se aplicarán al caso. Tercero, se expondrán las distintas consideraciones de diseño estructural, que surgieron a lo largo del proceso de homologación, y por último se abarcara el tema del acondicionamiento y detalle miento constructivo.

Para validar las decisiones que se tomaron para la formulación de recomendaciones de diseño que se presentaran en el siguiente capítulo, se recurrió a dos ingenieros civiles estructurales, reconocidos por su experiencia en el área de la construcción de edificaciones en Madera en Chile. Se consulto a Ignacio González de (www.eligemadera.com), y a Diego Valdivieso (PUC)

3.2 Caso de Estudio

El caso de estudio es un edificio residencial, ubicado en la comuna de Ñuñoa, este fue construido el año 2004, tiene un nivel de subterráneo y 11 pisos de Altura, su estructura se compone de muros y losas hormigón armado y una subestructura de tabiques ligeros, el cual se puede ver en más detalle en el **Anexo A**.

Los criterios de elección de este caso cumplen con diferentes condiciones definidas respecto a edificios residenciales inmobiliarios más construidas en Santiago, como:

- Materialidad: Su material predominante es el Hormigón Armado. Único material usado hoy en día en Chile en edificaciones en altura.
- Uso: Residencial. Su elección se debe a que la mayor cantidad de edificios que se construyen son para uso residencial, sumado al gran déficit habitacional existente, se vuelve una oportunidad de estudio frente al problema mencionado.
- Ubicación: La Ubicación del edificio es en Ñuñoa, junto con sus comunas aledañas, tanto Providencia, Santiago y Las Condes concentran la mayor cantidad de edificios en la ciudad de Santiago.
- Cantidad de Pisos: La Cantidad de piso, se asocia a las tendencias en edificaciones residenciales, de las cuales la mediana altura es una de las que marca la pauta en cuanto a este tipo de edificaciones.
- Usuario: Clase social media o media alta y núcleos familiares entre 2 a 6 personas
- Tamaño de departamentos: entre 50m² y 80m²

Diseño Arquitectónico

El diseño arquitectónico del caso de estudio se rige principalmente por un pasillo horizontal, el cual funciona como circulación principal, dos núcleos de ascensores en cada lado, y un núcleo central de escaleras. En la figura 8, se aprecia la distribución del programa de la planta 1, y en la Figura 9 se muestra la distribución programática del piso 2, también se exponen los

diferentes tipos de departamentos que se utilizan en el edificio, con más detalles en la figura 10, en el cual los distintos tipos rondan entre los 56,20m² y los 74,70m², el caso del departamento de 56,20m², es solo un departamento debido a que en el primer y segundo piso hay una escalera extra, por lo que la distribución de metros cuadrados fluctúa más precisamente entre los 63,50m² y 74,70m²

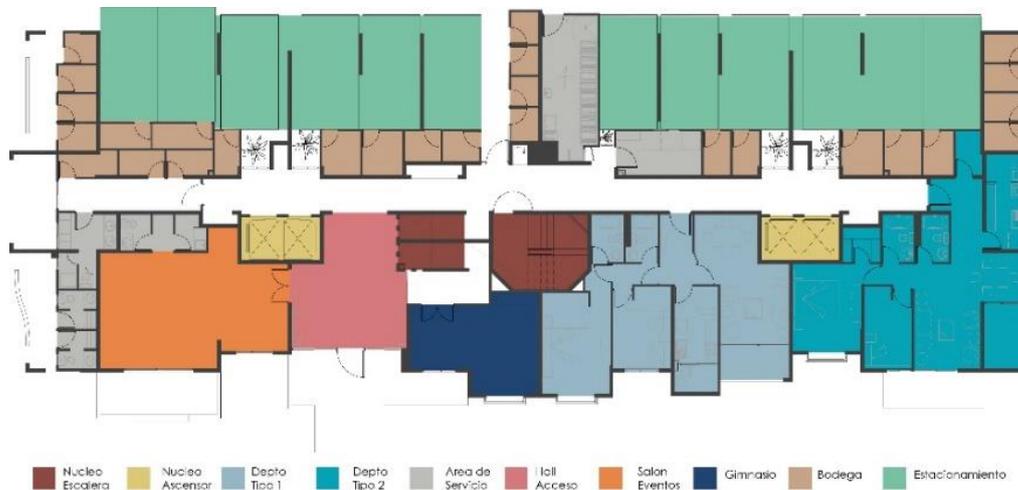


Figura 8. Planta Programa piso 1 Fuente: *Elaboración Propia*

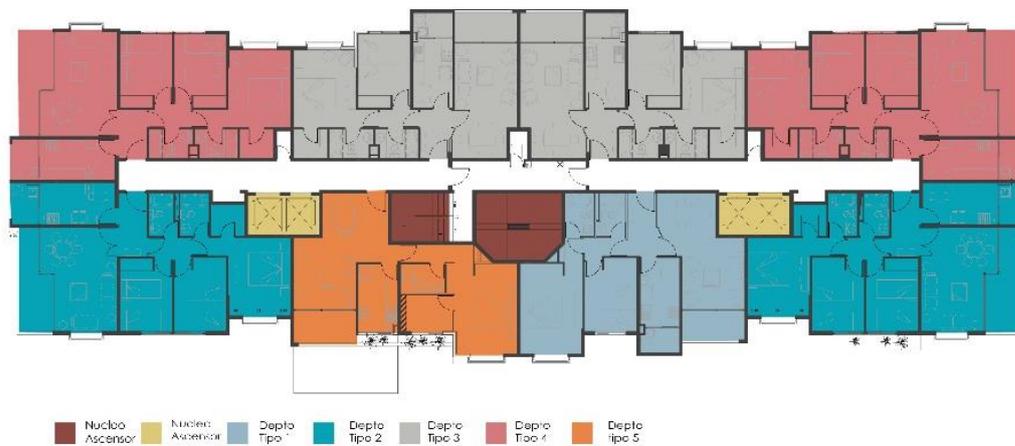


Figura 9. Planta Programa piso 2 Fuente: *Elaboración Propia*

Los tipos de departamentos (figura 10) permiten mostrar el tipo de núcleo familiar destinado para estos departamentos, por lo que, de acuerdo con la planimetría expuesta, estos núcleos familiares, rondan entre 2 y 6 personas, los que se pueden distribuir de la siguiente manera;

- CASO A) dos adultos más dos niños o dos adultos más cuatro niños
- CASO B) dos adultos más un joven o dos adultos más dos jóvenes



Figura 10. Tipología de departamentos

3.3 Criterios de homologación

La metodología de homologación se estableció para aproximarnos a un caso ya construido de edificio inmobiliario residencial, se establecieron diversos criterios para poder mantener la esencia inmobiliaria del edificio original, cuando este se exponga a las modificaciones derivadas de la aplicación de la metodología.

- **La homologación** busca la aproximación al edificio residencial inmobiliario más próximo a poder construirse en Chile, no necesariamente el más sustentable.
- **Se mantendrá** la disposición original, de áreas de servicios y espacios comunes,
- **Se mantendrá** la cantidad de departamentos por piso
- **Se mantendrá** las dimensiones de pasillos, puertas.
- **Se mantendrá** en la medida que se pueda la proporción de metros cuadrados entre los distintos espacios programáticos de los departamentos tipo
- **la tipología** de los departamentos solo se modificará, si es afectada por un elemento estructural esencial. (núcleos de servicios)
- **las terminaciones, y detallamiento constructivo** no se considerarán si el caso de estudio no cumple con la normativa actual.
- Para efectos del ejercicio de investigación, se establece omitir lo menor posibles estudios de cabida y rasante, del terreno original.

Los Criterios de homologación, establecidos se consideran pertinentes para aislar el caso de estudio de factores incidentes, que podrían desviar el objetivo principal de la investigación.

3.4 Consideraciones de diseño Estructural

Las consideraciones para establecer el sistema estructural se basaron en la premisa de utilizar fundaciones, un podio (primer piso) y dos núcleos estructurales de servicio de hormigón armado, esta elección se base principalmente en dos principios. Uno es la percepción cultural, la cual, al introducir un nuevo material en una cultura acostumbrada a edificios de Hormigón Armado, se considera una estructura hibrida un camino adecuado, para la transición hacia edificaciones de madera masiva, que incorporen un porcentaje mayor de madera. El segundo principio de esta elección se debe a la experiencia estructural que ya se tiene actualmente en hormigón armado, por lo que por un lado se amplía la cobertura de las regulaciones estructurales que existen respecto a esta, y por otro hay una experiencia de mano de obra asociada a esta.

Por otro lado, respecto a los elementos de madera masiva, se consideró en la primera iteración la utilización del mayor porcentaje de madera en la edificación, por lo que se eligió el CLT, luego en la segunda iteración se optó por utilizar un sistema de pilar y viga de LVL, que finalmente se adaptaba de mejor manera a las condiciones normativas actuales, y complementaba de mejor manera la premisa establecida, respecto a la utilización de ciertos elementos de hormigón armado. En la tabla 6 se muestran las diferencias entre el edificio original y las dos iteraciones realizadas a lo largo de la investigación.

	Edificio Original	Iteración 1	Iteración 2
Sistema Estructural General	Hormigón armado	Sistema Hibrido H.A + CLT	Sistema Hibrido H.A + Pilar y Viga LVL + Losas CLT
Sistema gravitacional	Hormigón armado	Muros y Losas de CLT	Pilares, vigas de LVL y Losas de CLT
Sistema Lateral	Hormigón armado	Losas de CLT y núcleos de hormigón armado	Sobre losa de hormigón reforzado, y núcleos de hormigón armado
Núcleos	Dos núcleos de ascensores, más un núcleo de escalera de hormigón armado	Dos núcleos de ascensores y escaleras de hormigón armado	Dos núcleos de ascensores y escaleras de hormigón armado
Fundaciones	Hormigón armado	Hormigón armado	Hormigón armado
Podio (1er piso)	Hormigón armado	Hormigón armado	Hormigón armado
Losas	Hormigón armado	Losas de CLT	Losa de CLT, más sobre losa de hormigón reforzado
Muros	Hormigón armado	Muros de CLT	Tabiques compuestos de Metalcom no estructural
Muros Exteriores	Hormigón armado	Paneles Modulares	Paneles Modulares
Tabiques	Entramado de acero	Muros de CLT	Tabiques compuestos de Metalcom no estructural

Tabla 6. Diferencias Edificio original e iteraciones

Proceso

1era Iteración

El primer desafío de la homologación estructural tuvo dos aristas, una fue la incorporación de dos núcleos, lo que produjo un problema en la disposición y tamaño de los departamentos del diseño original, y por otro lado fue encontrar un método de homogenizar los distintos tamaños y disposición de los muros estructurales, ya que como podemos ver en la figura 11, estos tienen una distribución y tamaño más heterogénea, lo que en contraste a la experiencia que se tiene con uso de la madera masiva, se intenta, que la mayor parte de los muros sean de medidas equivalentes para que su producción sea también eficiente, como podemos ver en la figura 11, uno de los primeros ejercicios, fue optimizar su geometría reduciendo la diversidad de tamaños de los muros de 72 piezas distintas a 14 tamaños de muros distintos por piso.

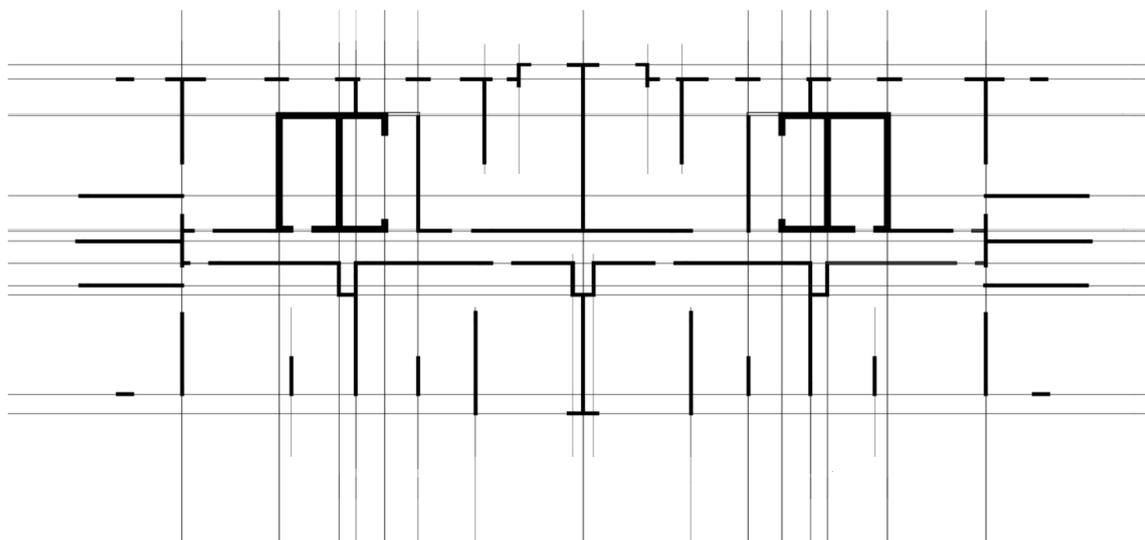
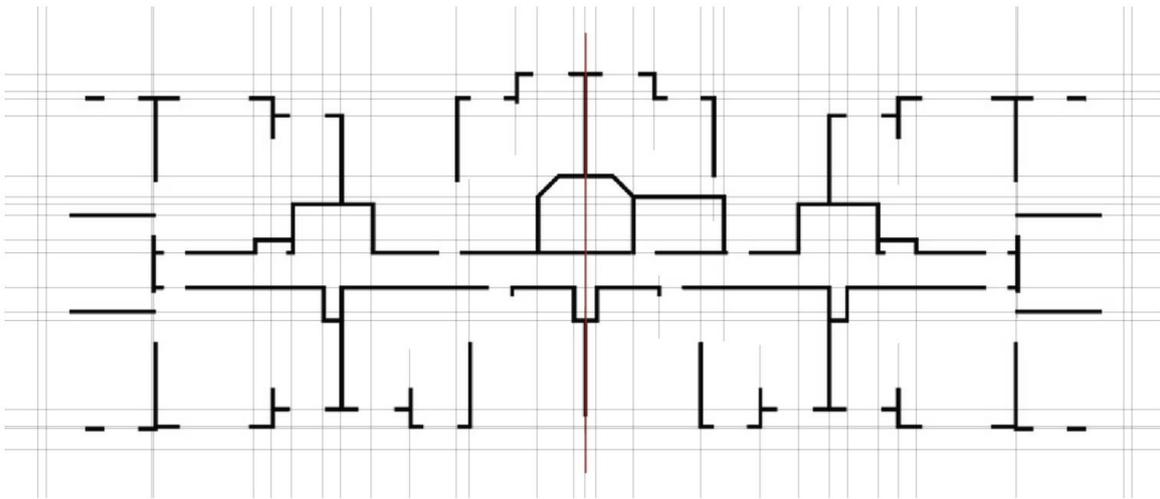


Figura 11. Distribución muros estructurales caso de estudio y distribución muros primera iteración Fuente: elaboración Propia

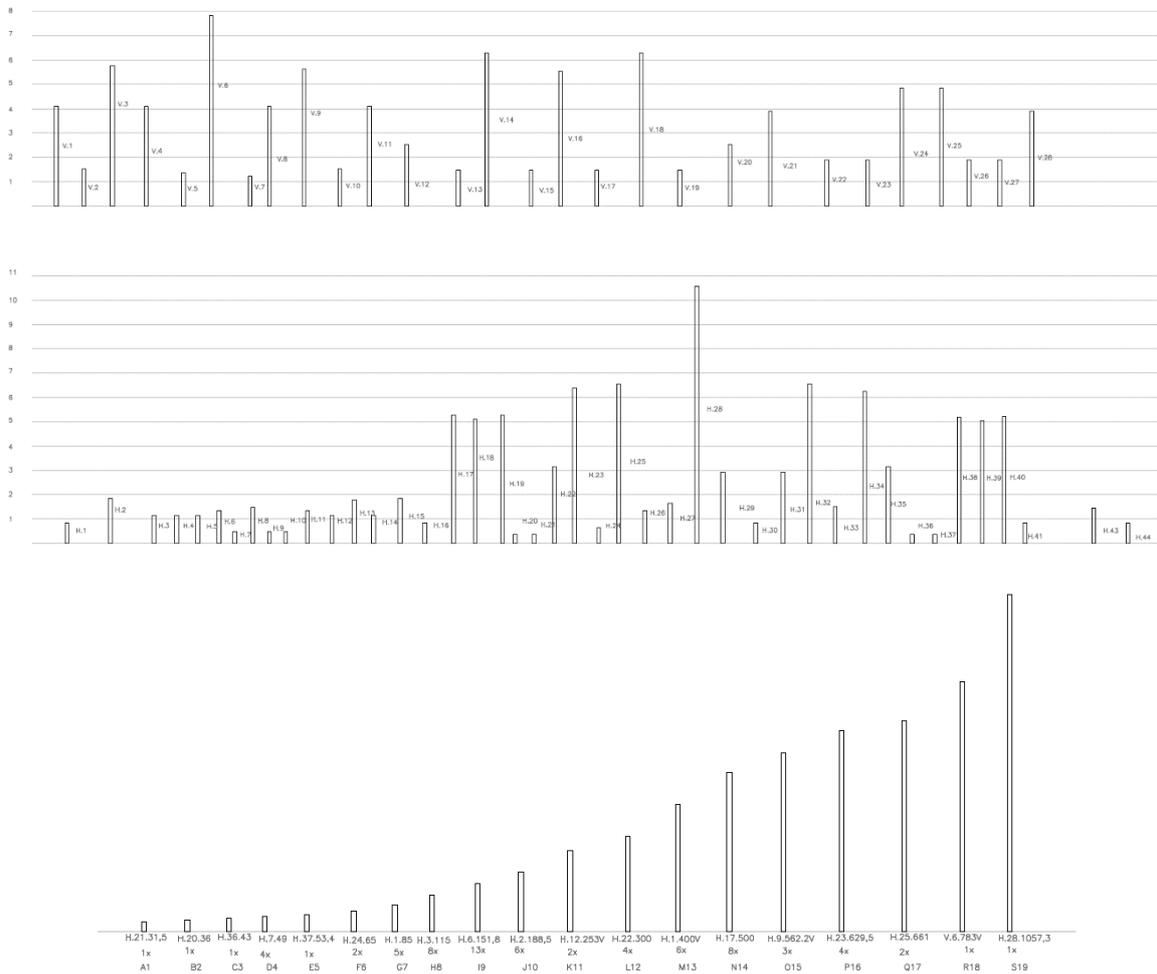


Figura 12. Listado de tamaños de muros originales v/s Listado de tamaños de muros optimizados fuente: elaboración propia

Finalmente, esta primera iteración la cual puede ser consultada en el **Anexo B**, en más detalle fue presentada a dos ingenieros estructurales, los cuales sugirieron ciertos lineamientos y recomendaciones, que impulsaron la segunda iteración.

En términos compositivos, la optimización de la forma se acercaba bastante a un prediseño adecuado, pero, para generar una mayor eficiencia, sería una mejor alternativa que la arquitectura se adaptara a una grilla, que funcionara como una base óptima para la estructura de madera. Una consideración importante respecto al sistema estructural elegido es que desde un punto técnico y económico no es factible técnicamente hacer trabajar el hormigón y al CLT al mismo tiempo, si bien se pueda realizar esta combinación, esta requiere un diseño estructural que incorpore el cálculo de esfuerzo estructural que el hormigón y CLT resisten en conjunto, ya que ambos empiezan a competir con la carga que tienen que resistir, estas condiciones, generan un aumento el costos, y por ende una inviabilidad para el segmento de edificaciones inmobiliarias.

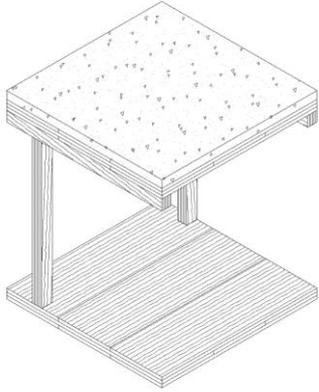
Se menciona que cuando se deseen realizar edificios específicamente con CLT, se recomienda utilizar CLT para todo el sistema estructural, para que estos trabajen en conjunto, pero en Chile, esta solución constructiva es afectada por la normativa Nch. 433. La cual en uno de sus apartados, en la tabla 5.1, que corresponde a los valores asignados a distintos materiales, respecto a su factor de modificación de la respuesta, que refleja las características de absorción y disipación de energía de la estructura, esta establece un valor de 11 para hormigón armado y 2 para madera, una interpretación simple de estas cifras como comentaban los expertos, es que la diferencia de 5,5 unidades entre ambos materiales, en el escenario en que el valor del CLT y el H.A fuesen iguales, afectaría aproximadamente en la misma proporción el valor de construir en CLT en comparación al hormigón armado bajo esta norma, por lo que se incorpora este segundo impedimento normativo para esta iteración.

Luego, de estas consideraciones desde los expertos, se estima relevante considerar estos aspectos económicos y técnicos, que afectan la primera iteración, debido a que el foco de la investigación son los edificios inmobiliarios que se caracterizan por su optimización de recursos y de rentabilidad, y el objetivo es acercarnos a la situación real actual más próxima, por lo que se propone la segunda iteración.

Segunda Iteración.

Esta iteración, como se menciona en la introducción de esta sección, utiliza como sistema estructural el mostrado en la tabla 7.

Tabla 7. Sistema estructural Segunda iteración

<p>Pilar: MLE o LVL</p> <p>Viga: MLE o LVL</p> <p>Losas: MCL o CLT + HA</p>	
---	--

Este sistema se caracteriza, por permitir que las cargas gravitacionales, sean soportados por la estructura de madera masiva, y que las sobre losas reforzadas unidas a los núcleos de hormigón armado puedan resistir las cargas laterales, sin que estas entren a competir, permitiendo una factibilidad normativa y de cálculo estructural.

Esta iteración, en términos compositivos y solución en planta, como se puede apreciar en más detalle en el **Anexo C**, se aproxima según los expertos a un diseño estructural eficiente para edificaciones inmobiliarias de mediana/ gran altura, respecto a uno de los casos edificatorios que están en proceso de ser construidos en Chile, como los es el caso del edificio Tamango de Tall Wood, que es un edificio inmobiliario proyectado para construirse en Coyhaique. En este edificio Diego Valdivieso, uno de los expertos entrevistados, participo en el equipo de ingenieros, por lo que permitió aproximarnos a ciertos lineamientos o consideraciones, que entablaban entre ingenieros estructurales y arquitectos.

El proceso de esta iteración se expone en detalle en el próximo capítulo de recomendaciones de diseño.

3.5 Acondicionamiento y detallamiento constructivo

Para cumplir con los distintos requerimientos de acondicionamiento basados en la normativa vigente hasta el 2021, se propone la utilización de diferentes materiales complementarios que permiten generar paquetes constructivos, que satisfagan los requerimientos respecto a la resistencia al fuego, aislación acústica y acondicionamiento térmico.

Respecto a la aplicación de una homologación en cuanto a soluciones constructivas y de acondicionamiento, no se pudo acceder a los detalles constructivos primarios del edificio del caso de estudio, sumado a que el edificio fue construido el 2004, este no considera las exigencias actualizadas del año 2016, y los distintos ajustes que han sido modificados. Por lo que no se homologaran las soluciones constructivas.

se detallarán, distintas consideraciones para las recomendaciones de cumplimiento normativo.

Para la **resistencia al fuego** es uno de los aspectos más importantes en las construcciones en Madera Masiva, si bien uno de los aspectos atractivos es utilizar la madera a la vista y sus propiedades positivas debido a sus cualidades biofílicas en los espacios. Es importante tener un control, y tener una proporción en que la madera estructural expuesta sea la menor posible, y así evitar daños en la estructura en caso de incendios.

Para la **aislación acústica**, en losas es importante considerar dos aspectos, uno es la aislación del ruido acústico y el otro por impacto, para generar este tipo de soluciones es importante aumentar su masa, incorporando materiales externos que permiten llegar a los valores determinados por la normativa, por otro lado, como los muros internos deben ser tabiques, estos deben incorporar capas externas para que cumplan con los requerimientos de habitabilidad óptimos.

Para el **acondicionamiento térmico**, si bien la madera tiene una gran resistencia térmica, al aplicar la segunda iteración, en la cual la estructura interna de los pisos son pilares, hay que considerar que los muros van a ser tabiques no estructurales los cuales deben ser compuestos para cumplir con la normativa.

Detallamiento constructivo

El diseño constructivo se basa en dos etapas, la primera es la fase húmeda: considerada la fase de hormigón armado en donde se construirán las fundaciones, el podio y los núcleos verticales. La Segunda fase de montajes se basa en la prefabricación de las diferentes piezas utilizadas como Losas, Muros y Fachada. La tercera fase de montaje,

3.6 Conclusión

En Conclusión, la aplicación de la metodología de homologación aplicada al caso de estudio nos permite aproximarnos a un caso de edificio inmobiliario ya construido, entregándonos distintas concepciones y características que tienen este tipo de edificios. Su diseño arquitectónico, muestra los distintos programas del edificio, su distribución espacial,

que a su vez muestran los distintos requerimientos normativos de dimensionamiento utilizados en el sector inmobiliario. también se pudo extraer el usuario objetivo al que está dirigido el caso de estudio, que permiten una aproximación a este arquetipo inmobiliario de edificaciones. También la aproximación desde un caso real permitió una lectura de la relación existente entre la estructura, sus dimensionamientos, el material y su arquitectura.

Se extrae desde la aplicación de la metodología, que en el caso de estudio hay una relación más estricta desde la arquitectura hacia la estructura, lo que se traduce en el caso de estudio, una gran variedad de distintas dimensiones de muros y tabiques, por lo que hay una baja optimización geométrica respecto a su forma, lo cual no es negativo, al contrario, es una característica que proporciona el hormigón armado, poder responder de manera positiva a geometrías más heterogéneas. Por otro lado, al enfrentarnos, a la utilización de madera masiva, se tuvo que recurrir a consideraciones estructurales desde una etapa temprana de diseño, por lo que las decisiones estructurales y arquitectónicas se emplean de forma paralela.

Finalmente, las iteraciones realizadas permitieron transitar desde el modelo edificatorio común realizado en Chile, hacia consideraciones específicas que se desprenden en el cambio de materialidad principal a madera masiva, respaldado por lo entrevistas realizadas a los ingenieros civil estructural, se proporcionaron las bases para las recomendaciones de Diseño.

4. Recomendaciones de Diseño

4.1 Introducción

Este penúltimo capítulo se enfoca en exponer distintas recomendaciones de diseño, para la prefabricación e industrialización de edificaciones de mediana altura. El modelo edificatorio final (Iteración 2), se desarrolló a partir de la metodología aplicada al caso de estudio de la investigación expuesta. Para abarcar los distintos elementos que componen la edificación y poder entregar lineamientos y recomendaciones, se dividirá este capítulo en distintas secciones. El primero muestra el resultado de la homologación exponiendo el modelo final, luego las recomendaciones de diseño estructural, las recomendaciones arquitectónicas y espaciales que implican la incorporación de la madera masiva, y finalmente las recomendaciones de cumplimiento normativo, respecto a ciertos paquetes constructivos que permiten cumplir con las exigencias normativas.

4.2 Resultados homologación

El resultado de la homologación permitió el desarrollo de un modelo edificatorio cercano a la realidad inmobiliaria actual, en el cual se logró mantener el partido general arquitectónico del edificio original, pero en que algunos departamentos experimentaron algunas modificaciones de dimensiones debido a la incorporación de los núcleos de hormigón armado, que fueron solucionadas otorgando cualidades espaciales, que hoy en día son tendencias inmobiliarias en sector donde se emplaza el edificio, Ñuñoa.

Respecto a su diseño estructural, uno de los puntos más críticos, al momento de constituir un modelo edificatorio de estas características debido a la poca experiencia local existente, pero gracias a las entrevistas e iteraciones, se pudo establecer un modelo edificatorio cercano a los proyectos, que están a prontas de construirse como lo es el edificio Tamango, ubicado en Coyhaique, en el **Anexo C** se pueden ver con más detalle la planimetría del modelo final desarrollado.

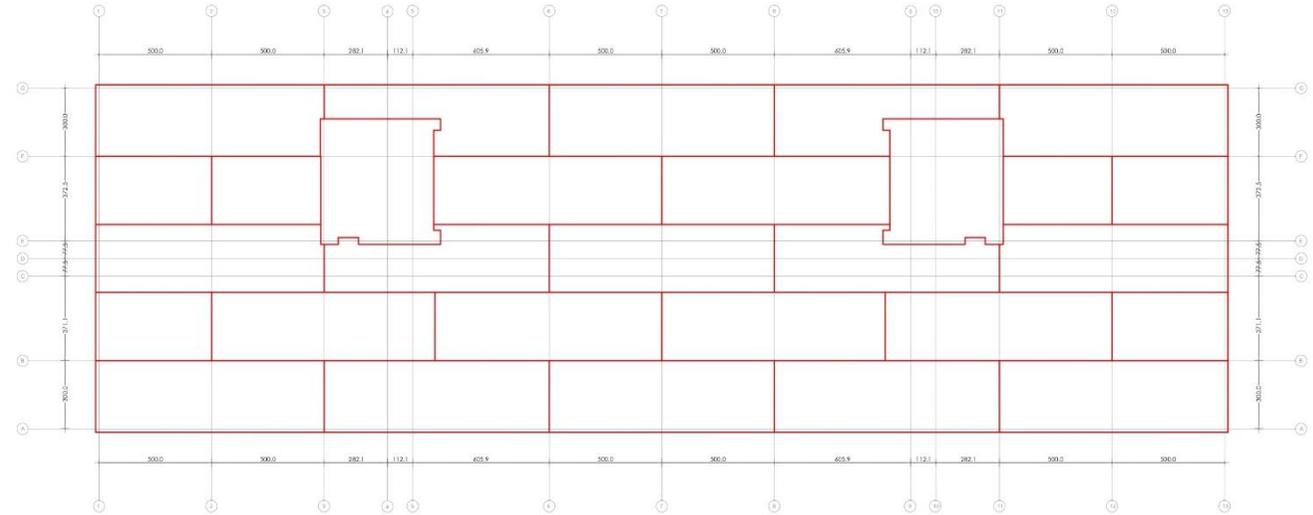
4.3 Recomendaciones de diseño estructural

Las recomendaciones presentadas en la Tabla 8, se establecen con el fin de cumplir con el objetivo de generar un diseño integral, sistemático y eficiente de modelo edificatorio para el sector inmobiliario residencial.

Distribución de Losas

Se recomienda que las losas vayan de manera intercalada por razones estructurales, considerar en la intersección losas - losa, posicionar un apoyo como un muro o viga.

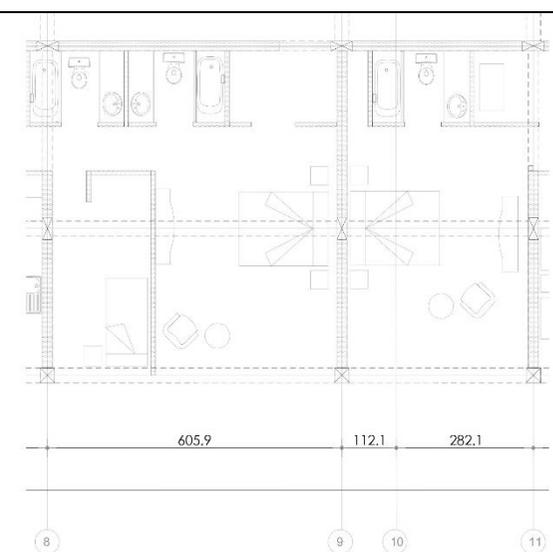
Sus dimensiones dependen del fabricante y de la capacidad de carga de los transportes locales, en nuestro caso se utilizaron losas de 12 mt x 3 mt, como elemento de repetición



Espesor de Losa

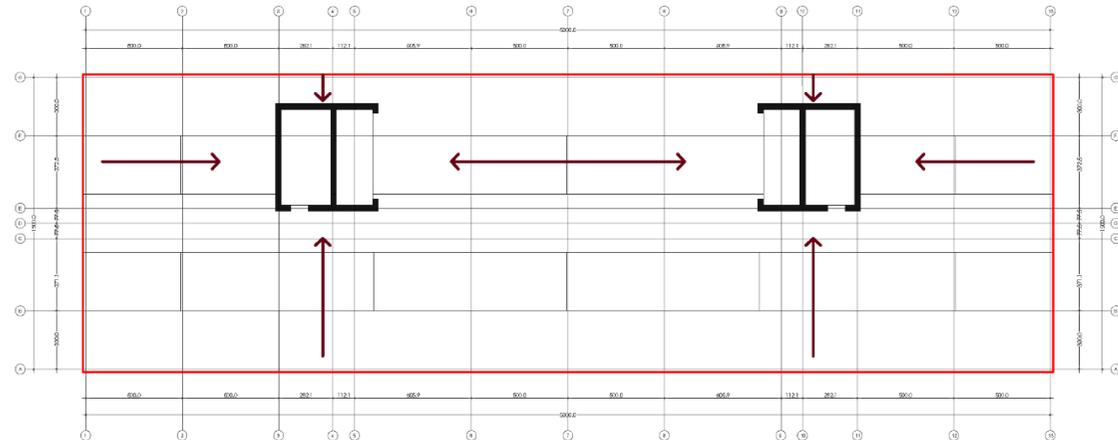
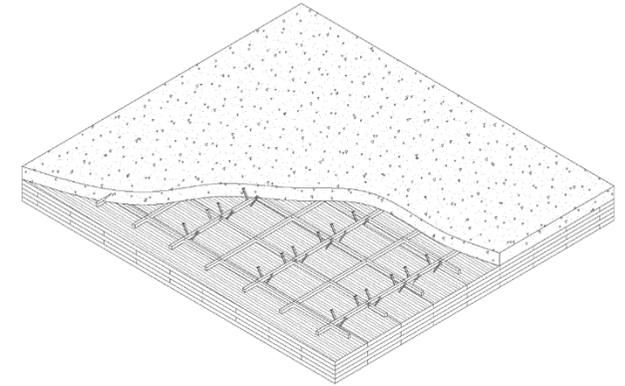
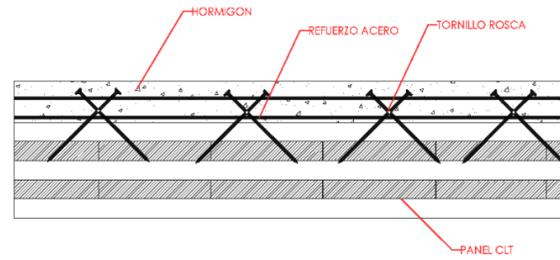
Para optimizar costos, se recomienda la menor distancia entre apoyo de las losas, con esto se puede reducir el ancho de la losa.

En el edificio propuesto, la mayor distancia entre vigas corresponde a 605,9 cm, por lo que para el caso se recomienda utilizar una Losa de CLT de 5 capas, de 180 mm de ancho



Sistema de Transferencia de Cargas

Para establecer el sistema de transferencia de cargas horizontales, se consideró que la más apta, es utilizar el sistema llamado Timber Concrete Composite (TCC), que nos permite mantener independiente los dos sistemas estructurales, el horizontal y el gravitacional. Este sistema posiciona sobre la losa de CLT, una losa de H.A., que unifica el diafragma y transfiere las cargas desde el extremo del edificio hacia los núcleos de hormigón armado.

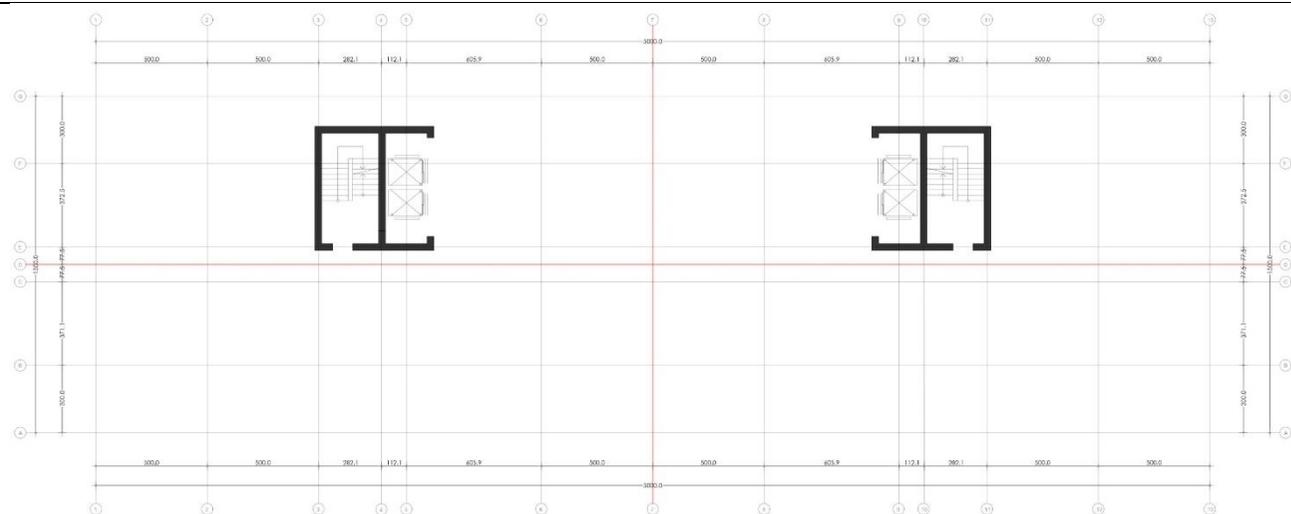


Núcleo

Se recomienda en la teoría, que el o los núcleos se ubiquen en el centro del edificio.

Se recomienda por otro lado, que las tuberías de servicios sanitarios se ubiquen en el núcleo, por si en el caso de fuga, el agua no llegue a la madera, afectando la estructura.

En el edificio, se posicionan dos núcleos manera excéntrica a los ejes centrales, pero son equidistantes del centro gravitacional del edificio, el núcleo se compone de muros de H.A de 300 mm de ancho.



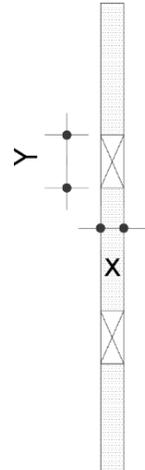
Pilares

Los pilares son de LVL. La sección de los pilares se recomienda que disminuya a medida que va aumentando la altura, esto genera ahorro de costos.

En el edificio se utilizaron dos tipos de pilares, cuadrados y rectangulares, como se puede ver en la tabla, la variación de sección,

En el caso de los Pilares de sección rectangular se recomienda, disminuir su longitud solo en el eje Y, para mantener el espesor del muro en el proyecto.

	PILAR SECCIÓN CUADRADA	PILAR SECCIÓN RECTANGULAR
TIPO DE PILAR		
PISOS 2 AL 5	X = 300mm Y = 300mm	X = 200mm Y = 450mm
PISOS DEL 5 AL 8	X = 250mm Y = 250mm	X = 200mm Y = 400mm
PISOS DEL 8 AL 11	X = 200mm Y = 200mm	X = 200mm Y = 350mm

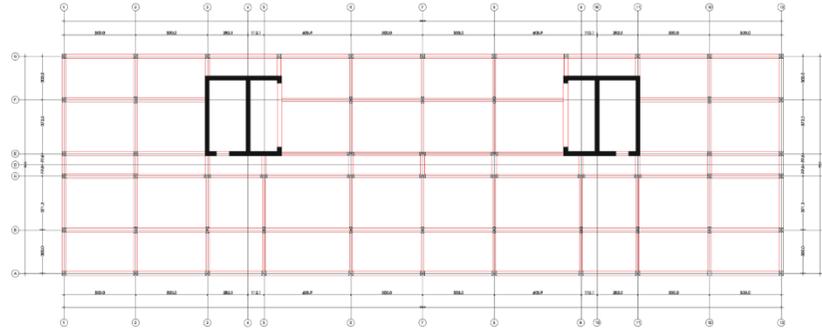


Muro Tipo, utilizando pilar de sección rectangular

Vigas

Las Vigas, deben conectar los distintos pilares, y soportar las losas. Se recomienda que las vigas se ubiquen debajo de la intersección de la unión entre losas.

En el edificio se utilizaron dos secciones de vigas, que responden también al dimensionamiento de los pilares,

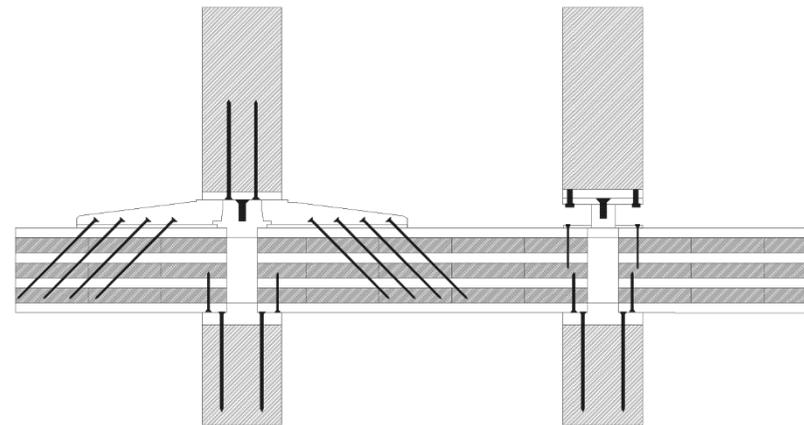


	VIGA 1	VIGA 2
SECCIONES		
DIMENSIONES	X = 200mm Y = 400mm	X = 300mm Y = 400mm

Unión Pilar - Pilar

La unión que se recomienda para este tipo de edificaciones es una unión que no cargue la losa, hay dos uniones que se recomiendan, una es la llamada "pillar", y la otra se llama "spyder", ambas del proveedor Rothoblass

En este edificio, se escogió la solución llamada "Pillar", ya que se adapta de mejor manera a la grilla establecida.

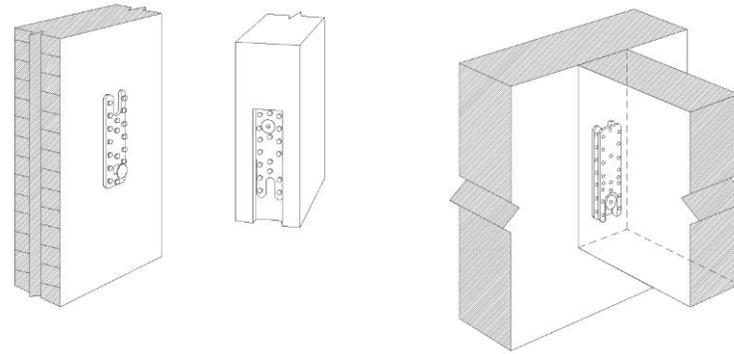


Unión "Spyder"

Unión "Pillar"

Unión Pilar y Viga

La unión que se recomienda para este tipo de edificaciones es una unión oculta, para que no esté expuesta al fuego, la unión que se recomienda es una llamada de "CBH", del proveedor Simpson Strong-tie, también permite un fácil montaje

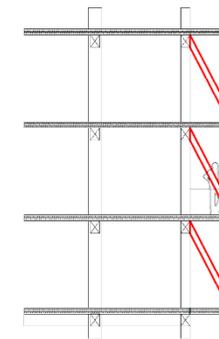
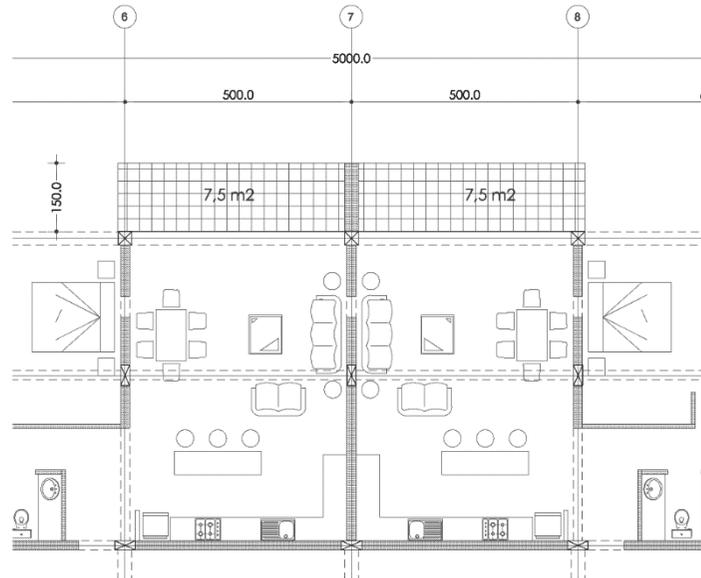


Balcones

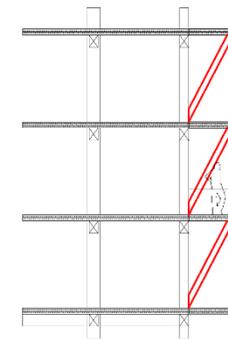
Los balcones se recomiendan que no tengan más allá de 10mt² de área y que no sobre salgan más allá de 1,5mt. Estos deben tener columnas en las esquinas.

Se recomienda también que la losa de la terraza sea independiente, de la losa del edificio, debido a que los balcones están más expuestos al medio. También debido a que una losa continua podría ser un puente térmico, afectando la habitabilidad.

Para los balcones se puede utilizar Madera Masiva o Acero, En el edificio se utilizó losas de CLT y columnas de LVL, opción 1 como muestra la figura.



OPCION 1

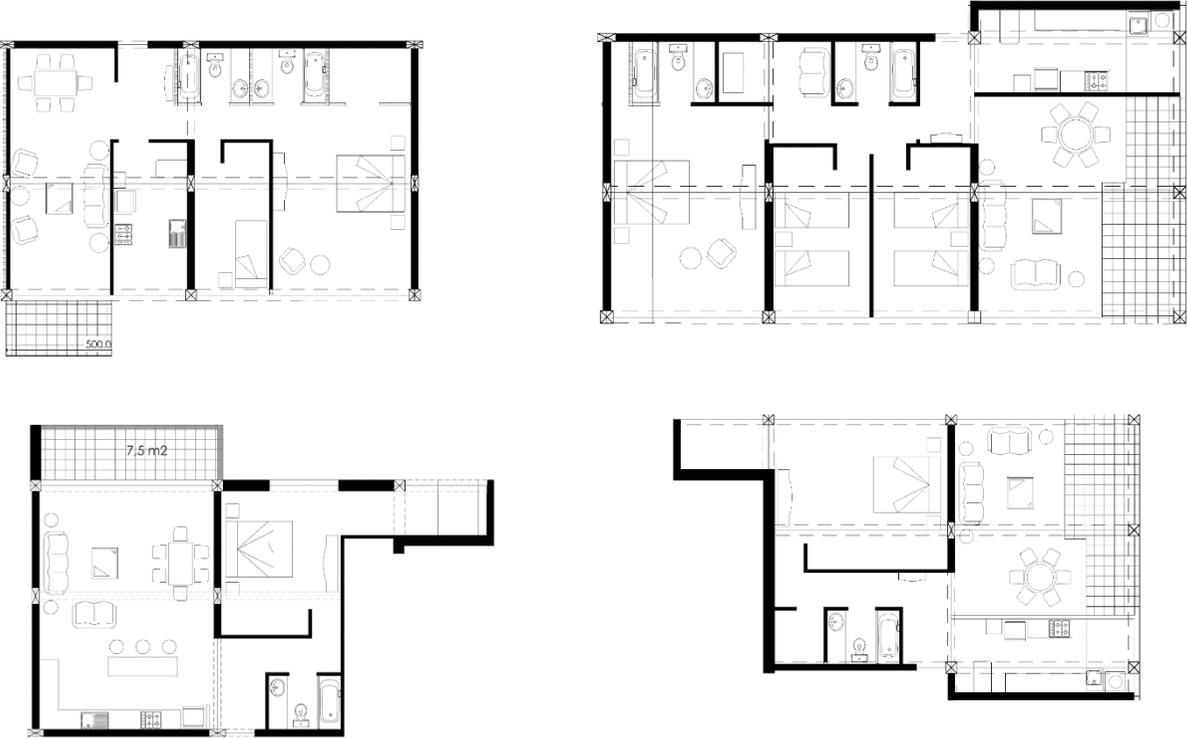


OPCION 2

4.4 Recomendaciones de diseño arquitectónico

Las Recomendaciones en la tabla 9, presentan los lineamientos y recomendaciones, que se diferencian del diseño original. Uno de los desafíos de la homologación era mantener los rasgos inmobiliarios homologado del edificio original de caso de estudio.

Tabla 9. Recomendaciones de diseño arquitectónico

Nombre de Recomendación	Descripción	Esquema
<p>tipología inmobiliaria</p>	<p>Una de las consideraciones, al aplicar la metodología de homologación, fue el ejercicio de adaptar ciertos departamentos, a la nueva disposición espacial, que provoco un replanteamiento de algunos departamentos tipos del diseño original.</p> <p>Para incluir nuevas tipologías de departamentos, se recomienda hacer un estudio de tendencias inmobiliarios, que se encuentren en zonas cercanas al proyecto, en nuestro caso, el proyecto se ubica en Ñuñoa, por lo que las tendencias muestran en general la tipología de departamentos con espacios abiertos.</p>	

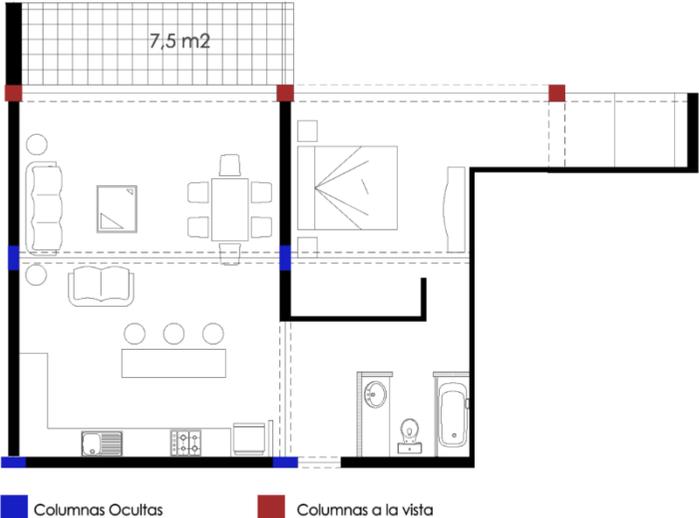
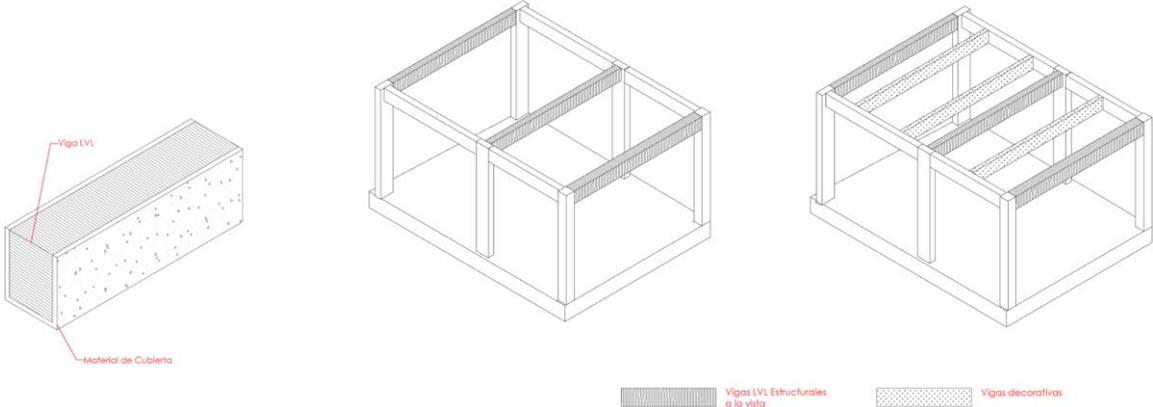
Fachada Modular

Para la fachada se recomienda una fabricación modular en fábrica, esto permite tener más control en su proceso, y evitar fallas en obra. Su estructura se recomienda que sea de entramado ligero en madera o Metalcom no estructural.

Para este caso de estudio se decide utilizar una estructura interna de Metalcom no estructural, debido a la homogeneidad de las piezas, y la experiencia de la mano de obra local.

Se recomienda dividir la fachada con las diferentes combinaciones de vanos que la edificación indique



<p>Columnas ocultas y a la vista</p>	<p>Se recomienda que, para terminaciones internas, controlar la cantidad de columnas a la vista y ocultas.</p> <p>La capacidad de poder ocultar los elementos constructivos de madera permite generar un modelo de edificio inmobiliario común con estructura interna de madera masiva.</p>	 <p>7,5 m²</p> <p>■ Columnas Ocultas ■ Columnas a la vista</p>
<p>Terminaciones de Viga</p>	<p>Se recomienda, para terminaciones de vigas, diferentes alternativas, desde la opción de cubrir la viga, lo que permite asemejarse interiormente a un edificio inmobiliario común, otra opción es mantenerla a la vista, y por último la alternativa de incorporar más elementos ornamentales en madera. Por lo que permite disimular o intensificar el material estructural.</p>	 <p>Viga LVL</p> <p>Material de Cubierta</p> <p>Vigas LVL Estructurales a la vista Vigas decorativas</p>

Terminaciones de Fachada.

Para las terminaciones de acuerdo con lo investigado, se recomiendan tres alternativas.

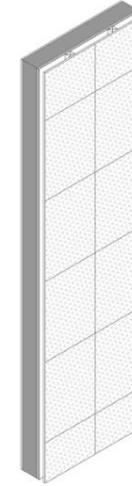
Revestimiento de fibrocemento, asimilando un edificio común. La segunda opción es la utilización de madera con un machihembrado, y la tercera opción es utilizar HPL (Laminado de alta presión), el cual es producto que tienen diversos beneficios de confort y durabilidad.



Terminación
Fibrocemento



Terminación
Madera machihembrado

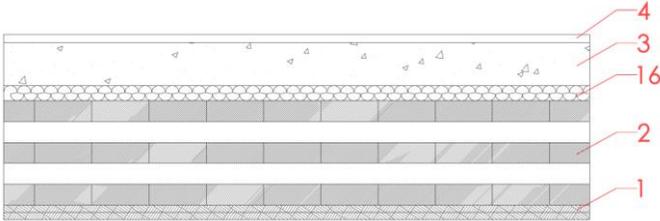


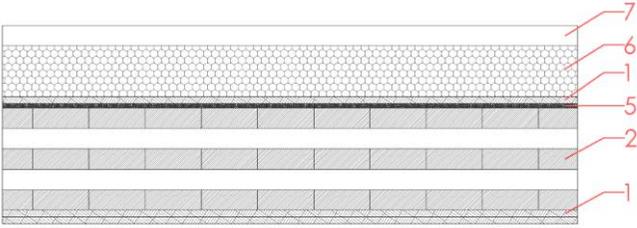
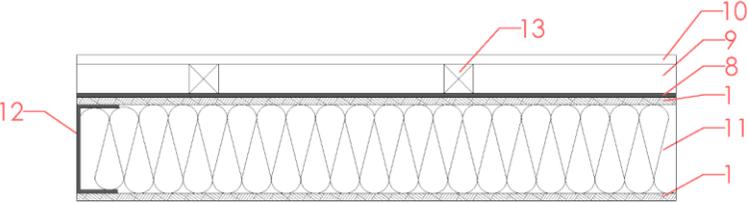
Terminación
HPL (Laminado de alta presión)

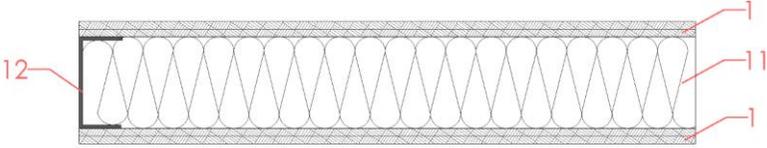
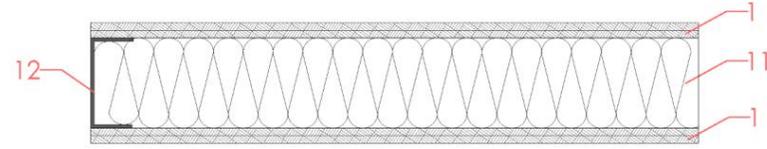
4.5 Recomendaciones de cumplimiento normativo

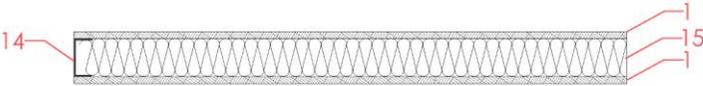
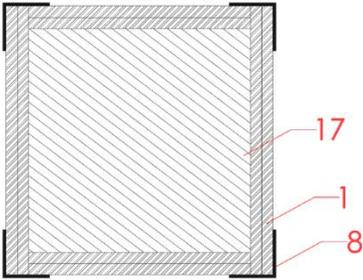
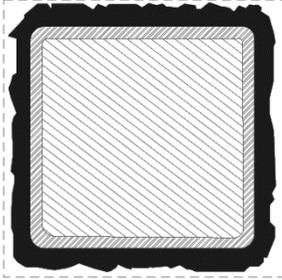
En la tabla 10 a continuación se detallarán distintas soluciones constructivas para diferentes partes del edificio para cumplir con diferentes requerimientos normativos de habitabilidad, las soluciones presentadas son exclusivas para el caso de estudio desarrollado producto de la homologación realizada. Las cifras expuestas indican una aproximación ya que se conforman de acuerdo con una combinación de soluciones nacionales e internacionales.

Tabla 10. Recomendaciones de cumplimiento normativo

Nombre de Recomendación	Descripción	Esquema
<p>Losas entre departamentos</p>	<p>Acústico índice reducción acústica: 57 dbI índice reducción de impacto: 50 dbI *basado en guía de Woodworks Resistencia al Fuego Se necesita un f-120 *basado en la solución del MINVU</p>	 <p style="color: red; text-align: center;">Losas entre departamentos</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.- 2x Placa Yeso/cartón e:12,5mm 2.- Panel CLT e: 180mm 3.- Losa Estructural H.A e:100mm 4.- terminación Piso 16.- Goma acústica GenieMat FF25 e: 25mm

<p>Losas Techos</p>	<p>Acústico Sonido de aire: 57dbI Sonido de impacto 50 dbI *basado en guía de Woodworks</p> <p>Resistencia al Fuego Se necesito un f-120 f-120 Aislación térmica R: 2.1 m²K/W</p>	 <p style="text-align: center;">Losas Techo</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.- Placa Yeso/cartón e:12,5mm 2.- Panel CLT e: 180mm 5.- Plástico Polipropileno e: 0,8mm 6.- Poliestireno expandido e: 90mm 7.- Terminación Techumbre 1.- 2x Placa Yeso/cartón e:12,5mm
<p>Muros Exteriores</p>	<p>acústico índice reducción acústica:</p> <p>Fuego Se necesito un f-30 f-100</p> <p>Aislación térmica R: 1.14 m²K/W *basado en la solución del MINVU, código 1.2.M.C26.5</p>	 <p style="text-align: center;">Muro Exterior</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.- Placa Yeso/cartón e:12,5mm 8.- Membrana de Silicona líquida 9.- Sub-Estructura Fachada Ventilada e:70mm 10.- Terminación Exterior 11.- Aislación Lana mineral e: 150mm 12.- Canal Cintac 150x75x5 13.- Listonado de madera 2x2"

<p>Muros entre pilares internos</p>	<p>Acústico índice reducción acústica: 49db *basado en la solución del MINVU, código 2- C14 Resistencia al Fuego f-30 * basado en la solución del MINVU, código A.2.3.30.44 Aislación térmica R: 1.34 m2K/W *basado en la solución del MINVU, código 1.2.M.C18</p>	 <p>Muro entre pilares e: 20mm</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.- Placa Yeso/cartón e:12,5mm 11.- Aislación Lana mineral e: 150mm 12.- Canal Cintac 150x75x5
<p>Muros entre pilares Divisorios entre unidades</p>	<p>Acústico índice reducción acústica: 49db *basado en la solución del MINVU, código 2- C14 Resistencia al Fuego f-120 * basado en la solución del MINVU, código A.2.3.120.22 Aislación térmica R: 2.17 m2K/W *basado en la solución del MINVU, código 1.2.M.C14</p>	 <p>Muro entre pilares e: 20mm</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.- Placa Yeso/cartón e:12,5mm 11.- Aislación Lana mineral e: 150mm 12.- Canal Cintac 150x75x5

<p>Tabiques</p>	<p>Acústico índice reducción acústica: 48db *basado en la solución del MINVU, código 2- C15.1</p> <p>Resistencia al Fuego f-30 * basado en la solución del MINVU, código A.2.3.30.44</p> <p>Aislación térmica R: 1.34 m2K/W *basado en la solución del MINVU, código 1.2.M.C18</p>	 <p style="text-align: center;">Tabique Genérico e: 105 mm</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.- Placa Yeso/cartón e:12,5mm 14.- Canal Cintac 80x40x3 15.- Aislación Lana mineral e: 70mm
<p>Vigas y Pilares</p>	<p>Resistencia al fuego f-120</p> <p>*basado en la solución del MINVU, código B.2.2.120.03</p> <p>Se recomienda, para protección frente al fuego, la solución para pilares o vigas la solución.</p> <p>Como alternativa, de diseño y protección, en el caso que se requiera dejar elementos de madera a la vista, se puede utilizar otra madera de revestimiento, llamada común mente como una capa de sacrificio, esto en el caso de incendio, se carboniza la capa exterior, protegiendo la madera estructural.</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="1016 735 1379 1015">  <p style="text-align: center;">Alternativa Protección Pilar/viga</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.- Placa yeso/cartón e:12,5mm 8.- Perfiles esquineros de metal galvanizado de 30 x 30 x 0,5 mm, 17.- Pilar o viga estructural </div> <div data-bbox="1630 735 1912 1015">  <p style="text-align: center;">Alternativa Madera expuesta</p> <ul style="list-style-type: none"> ┌ ┐ Borde de Pilar ■ Capa de Sacrificio ▨ Pirólisis (Madera Calentada) ▤ Sección Restante - Capacidad estructural retenida </div> </div>

5. Conclusión

En Chile, país que avanza lentamente en innovaciones para la construcción de edificios, los materiales utilizados tradicionalmente en la construcción – hormigón y acero - se han mantenido invariables por varias décadas, sumado al nulo crecimiento de los índices de productividad del sector de la construcción, por lo que renovar los paradigmas en la construcción con madera en cuanto a su capacidad estructural, espacial, de comportamiento ante el fuego, acondicionamiento térmico y comportamiento acústico. Aspectos relevantes al introducir la madera masiva en proyectos de edificaciones residenciales y enfrentar un futuro sostenible con el medio ambiente.

Para enfrentar los grandes índices de déficit habitacional en Chile, de manera sustentable, se reconoce el segmento edificatorio residencial de mediana altura, como una herramienta de densificación utilizada actualmente, con una alta tasa de permisos de edificación aprobados para este segmento, se determinó la relevancia de abarcar esta tipología, como un modelo homologable para otras edificaciones similares.

Las externalidades positivas en la utilización de la madera masiva, se presenta como un material renovable, que almacena dióxido de carbono (CO₂), aproximadamente una tonelada por metro cubico (m₃) de madera, lo que se traduce en una baja huella de carbono (en comparación con el acero y hormigón) en su producción. Chile al ser un país forestal, posee estos recursos lo que es beneficioso al hacer provecho de estos con un alto nivel tecnológico, también desde su aspecto energéticos, posee beneficios en su comportamiento térmico, y acústico.

En cuanto a la industria chilena de la madera, si bien se reconoce el potencial forestal de Chile, también se reconoce la necesidad de incorporar un mejor rotulado para la madera estructural, e incorporar un valor agregado de los productos madereros a través de la introducción de nuevas técnicas y tecnología asociadas, para la fabricación de elementos en madera masiva y permitir la expansión de su mercado.

En esta investigación, se buscó adaptar la experiencia extranjera en este tipo de edificaciones a la realidad chilena, esto contemplo la revisión de varios aspectos, como el estado de la madera masiva en el escenario internacional, búsqueda de nuevas tecnologías emergentes, el estado nacional de la industria, y los requerimientos inmobiliarios locales asociado edificaciones residenciales inmobiliarias. La metodología utilizo como fuente primaria, un edificio inmobiliario ya construido y el objetivo posterior, de generar una transformación a sistemas estructurales en madera masiva, lo que desprende ciertos argumentos, lineamientos y recomendaciones para un diseño altamente estandarizado y replicable.

Por lo que se puede concluir que esta investigación de seminario de licenciatura, es que abordo la incorporación de la madera masiva en edificios inmobiliarios residenciales desde una metodología sistemática, de manera de aproximarnos desde un caso de estudio real ya establecido, y una metodología de homologación, en la cual a través de modificaciones de un diseño original, y la retroalimentación de profesionales del área de la ingeniería, se desprendieron, recomendaciones actualizadas, originadas del análisis del proceso de diseño de edificios en madera masiva y edificios inmobiliarios residenciales tradicionales, cumpliendo con los distintos requerimientos inmobiliarios, tanto en aspectos de habitabilidad como normativos.

Por su parte, el proceso de aplicación de la metodología y la elaboración de las recomendaciones, declaran diferencias en los procesos o secuencias en el diseño, por un lado, el edificio original, permite apreciar la secuencia tradicional, desde el diseño arquitectónico, y luego la incorporación de la solución constructiva, que se adapta a la

arquitectura propuesta. Por otro lado, para las edificaciones con madera masiva, uno de los aspectos claves en el proceso fue la entrevista con los ingenieros estructurales, desde una etapa temprana de diseño, lo que permitió definir y alinear, una grilla base en la cual el diseño se adaptara a ella, por lo que los procedimientos proyectuales de diseño se diferencian, dependiendo del sistema constructivos escogido.

Las recomendaciones, expuestas de diseño estructural y arquitectónicas, presentaron lineamientos básicos desde la composición geométrica básica, como la utilización de una grilla base, que posicionara y distribuyera los distintos programas y circulaciones.

Unos de los aspectos más importantes fue la elección del sistema estructural, este definió en gran medida el acercamiento al escenario actual respecto a la posibilidad de edificar este tipo de edificios. La elección de un sistema estructural híbrido permitió atribuir las fuerzas laterales al hormigón armado y las fuerzas gravitacionales a la madera, de modo de poder adaptarnos a la normativa actual, la que posee parámetros establecidos específicos para la utilización de hormigón armado.

Otro aspecto relevante fue la utilización de dos secciones distintas de pilares, lo que permitió la aproximación en la utilización tradicional de muros, en departamentos residenciales, y permitir la adaptación del sistema estructural hacia la arquitectura inmobiliario residencial. También hay lineamientos respecto, a como generar eficiencia en costos, aspecto importante en el sector inmobiliario, como las recomendaciones de reducción de la sección de pilares a medida que se elevan los pisos, debido a la disminución de sus cargas por los pisos superiores y, por otro lado, la consideración de la distancia entre muros, para poder utilizar losas de menor espesor.

Las recomendaciones de diseño arquitectónico reconocieron en el caso de estudio una tipología de arquitectura, para la aproximación al modelo edificatorio requerido, También las recomendaciones, entregaron lineamientos para una construcción más industrializada, como la utilización de fachadas modulares, echas en fabrica, con distintas alternativas de terminaciones, además se abordó el tema de la utilización de madera expuesta, entregando ciertas recomendaciones y alternativas de diseño.

La tercera sección de recomendaciones, entrego los detalles constructivos, para cumplir con los requerimientos de habitabilidad y normativos, respecto al confort acústico, térmico y de resistencia al fuego, utilizando las soluciones, entregadas por el MINVU, sumado a la utilización de guías internacionales, se conformo un pack de soluciones para edificaciones residenciales de mediana altura.

Si bien, la incorporación de madera en el caso de estudio cumplió con el objetivo de cambiar el sistema estructural en un modelo edificatorio a madera masiva, los porcentajes de materiales utilizados en madera respecto al del hormigón armado, y otros materiales no estructurales, es más bajo de lo que se esperaba, por lo que se genera un espectro de mejora, para poder aumentar el porcentaje de madera y disminuir los que poseen más emisiones de carbono asociadas, se debe generar una actualización de la normativa, que considere la utilización de sistemas estructurales en madera masiva como el CLT, que incorporan más metros cúbicos (m_3)

Finalmente, este trabajo de investigación pretende incentivar la incorporación de la madera masiva en edificaciones residenciales de mediana altura, a través de recomendaciones, basadas en conocimientos de frontera, como una alternativa viable, y con un alto grado de industrialización, para aportar al aumento de los índices de productividad del sector de la construcción, enfrentar el déficit habitacional y permitir la divulgación de un sistema constructivo que aporte a combatir el cambio climático.

6. Bibliografía

- CChC. (2017). Déficit Habitacional. Recuperado de; <https://cchc.cl/2019/deficit-habitacional>
- Growing Buildings, (2017). Construcción y Emisiones de CO2 a la Atmosfera. Growing Buildings. Recuperado de <https://growingbuildings.com/construccion-y-emisiones-co2-a-la-atmosfera/>
- Ahvenainen, J., & Sousa, H. S. (2016). Multistorey building made of CLT : How to design it right ? *Seminário: "Construir Em Madeira,"* (January), 95–118.
- Banco Mundial. (2019). *Precios de vivienda: ¿quién tiene la razón?* Recuperado de; https://www.cepchile.cl/cep/site/docs/20190910/20190910163323/pder518_clarrain_srazmilic.pdf
- Banco Mundial. (2020). La Construcción de Viviendas en Madera: Un pilar para el desarrollo sostenible y la agenda de reactivación. I(CONSTRUCCION EN MADERA), 1–635.
- Blass, H. J., & Fellmoser, P. (2004). Design of solid wood panels with cross layers Influence of shear deformation τ τ τ Design methods for solid wood panels Calculation of solid wood panels with composite theory. *Design of Solid Wood Panels with Cross Layers.*, 604.
- CChC. (2019). *Gerencia de Estudios CChC El Sector de la Construcción ante el Desafío Climático Global.* Recuperado de; https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Fundamenta_45.pdf
- CChC. (2020). INFORME DE MACROECONOMÍA Y CONSTRUCCIÓN (MACH 52). *Modelo de Microsimulación Para Evaluar Medidas de Contención de Covid19 En Chile. (2020).*, (MACH 52), 47. Recuperado de; https://www.cchc.cl/uploads/archivos/archivos/INFORME_MACH52_abril_2020.pdf
- Central, B. (2014). Una mirada desagregada al deterioro de la productividad en Chile: ¿existe un cambio estructural? *Economía Chilena*, 17(1), 4–36. Recuperado de; https://www.comisiondeproductividad.cl/wp-content/uploads/2016/10/Una-mirada-desagregada-al-deterioro-de-la-productividad-en-Chile-FUENTES_-_GARCIA.pdf
- CNP. (2019). Informe anual 2019. *Internet*, 114. Recuperado de; http://rnfc.es/wp-content/uploads/2021/03/Informe-Anual-RNFC-2019_digital-1.pdf
- Conama. (2010). Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile. *Comisión Nacional Del Medio Ambiente-Gobierno de Chile.*, 64. Recuperado de; http://www.sinia.cl/1292/articulos-49564_informe_final.pdf
- Contreras, Y. (2011). The urban and residential renewal of the downtown of Santiago New inhabitants, significant sociospatial changes. *Eure*, 37(112), 89–113. Recuperado de; <https://doi.org/10.4067/S0250-71612011000300005>
- Dujic, B. & otros. (2006). *Experimental Investigation of Massive Wooden Wall Panel Systems Subjected To Seismic Excitation.* (March 2018), 3–8. Recuperado de; <https://www.researchgate.net/publication/323959727>
- FAO. (2019). GLOBAL FOREST PRODUCTS FACTS AND FIGURES. Recuperado de; <https://www.fao.org/3/ca7415en/ca7415en.pdf>
- Fierro, J. (2020). DISEÑO DE ENTREPISOS PARA EDIFICIOS HABITACIONALES DE MADERA Y DE CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA EN CHILE.
- FPInnovations. (2019). *CLT Handbook 1.*
- Gonzales & otros. (2019). SOLUCIONES PARA AISLACIÓN TÉRMICA Y ACÚSTICA DE UN EDIFICIO DE VIVIENDA SOCIAL EN CLT.
- Hernández, G. A. (2016). Estudio de la influencia de la modelación de las conexiones en una vivienda CLT.
- IEA. (2020). Renewables 2020 Analysis and forecast to 2025. Recuperado de; https://iea.blob.core.windows.net/assets/1a24f1fe-c971-4c25-964a-57d0f31eb97b/Renewables_2020-PDF.pdf

- INE. (2019). *Permisos de edificación autorizada Edición n°244. (56), 47.*
- INFOR. (2018). *Instituto Forestal 2018. 63–68.* Recuperado de; <https://wef.infor.cl/publicaciones/anuario/2018/Anuario2018.pdf>
- INFOR. (2019). *CONSTRUCCIÓN EN MADERA POLÍTICAS PÚBLICAS, FOMENTO Y LEGISLACIÓN EUROPA, NORTE AMÉRICA, OCEANÍA Y LATINOAMÉRICA.*
- Kahler, C. (2020). *Industria de la Construcción ¿ Por qué la Construcción ? ¿ Por qué la Madera ? INFOR.*
- MMA. (2018). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático.* Recuperado de; <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPANISH.pdf>
- MINVU. (2011). *Listado Oficial de Soluciones Constructivas*
- MINVU. (2014). *Listado Oficial de Comportamiento frente al fuego*
- MINVU. (2014). *Listado Oficial de Soluciones Constructivas para aislamiento acústico*
- Monsalve, N. (2019). *ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO SISMICO DE ESTRUCTURA DE MEDIANA ALTURA EN BASE A MADERA CONTRALAMINADA CON SISTEMA DE AISLAMIENTO BASAL.*
- Scarano, J. (2019). *Proyectar con Madera Contralaminada. 389–396.*
- Sepulveda, S. (2019). *EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN MURO TRIDIMENSIONAL DE MADERA CONTRALAMINADA.* Recuperado de; <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/3437>
- Skullestad, J. L. (2016). *High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure - A Comparative LCA of Structural System Alternatives. Energy Procedia, 96(1876), 112–123.* Recuperado de; <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.112>
- Wilson, A. W. & otros. (2019). *Modeling techniques for post-tensioned cross-laminated timber rocking walls. Engineering Structures, 195(November 2018), 299–308.* Recuperado de; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.06.011>
- WoodWorks. (2021). *Mass Timber Design Manual. 98.* Recuperado de; <https://info.thinkwood.com/masstimberdesignmanual>
- Instituto nacional de normalización (INN). *Nch 1198-2014: Madera – Construcción en madera – Cálculo.* Santiago, INN Chile.
- Instituto nacional de normalización (INN). *Nch 3171-2010: Diseño Estructural Cálculo. Combinaciones de Carga.* Santiago, INN Chile.
- Instituto nacional de normalización (INN). *Nch 433-2011: Diseño sísmico de edificios.* Santiago,

7. Anexos

7.1 Anexo A – Caso de estudio - Edificio “Palqui”

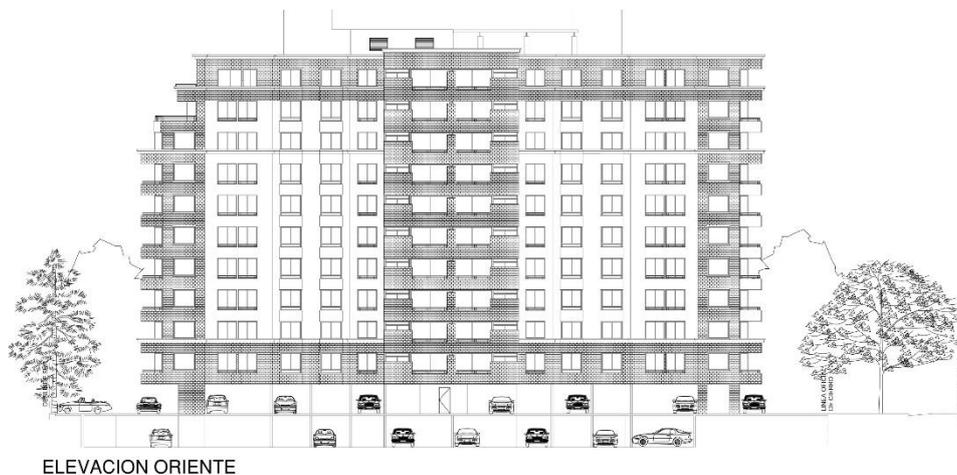
JRK Arquitectos – El uso de esta información es exclusivamente para uso académico

Ubicación: Ñuñoa

Año de Construcción: 2004



Planta General Piso 2



ELEVACION ORIENTE

7.2 Anexo B – Iteración 1
Edificio Compuesto de CLT

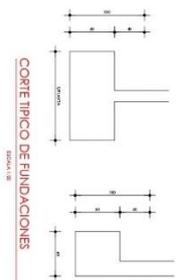
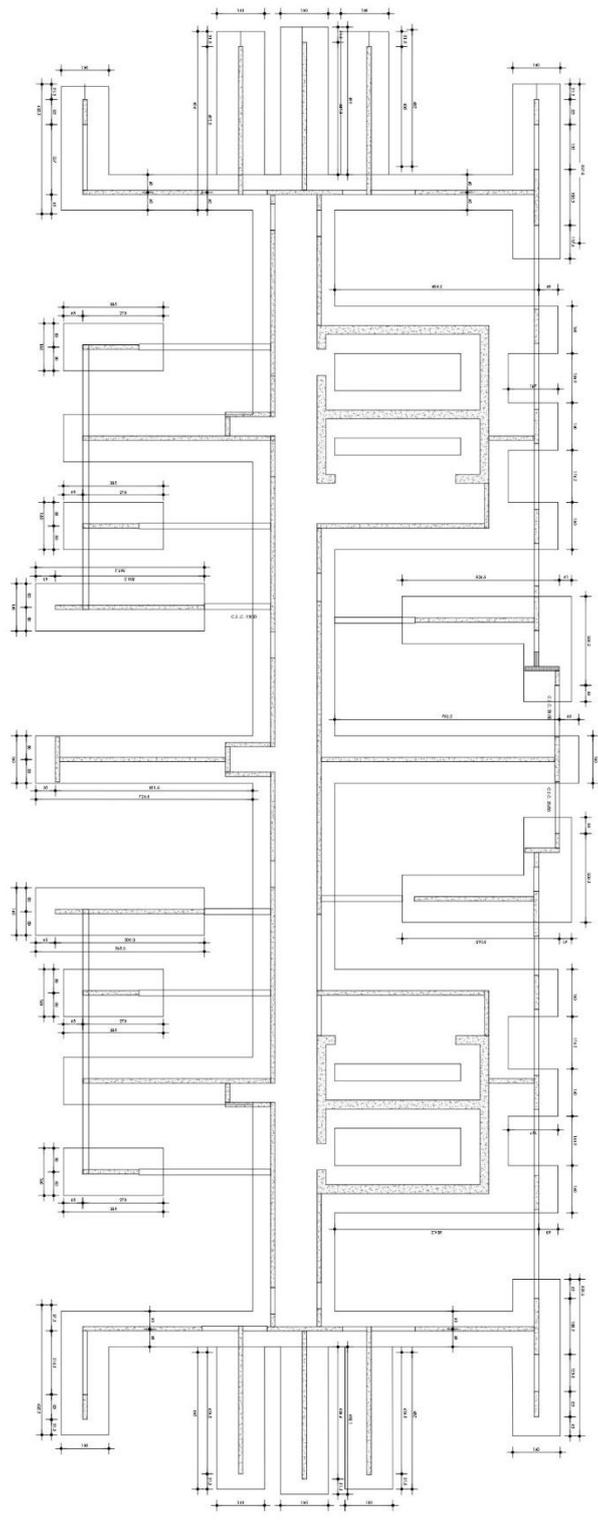




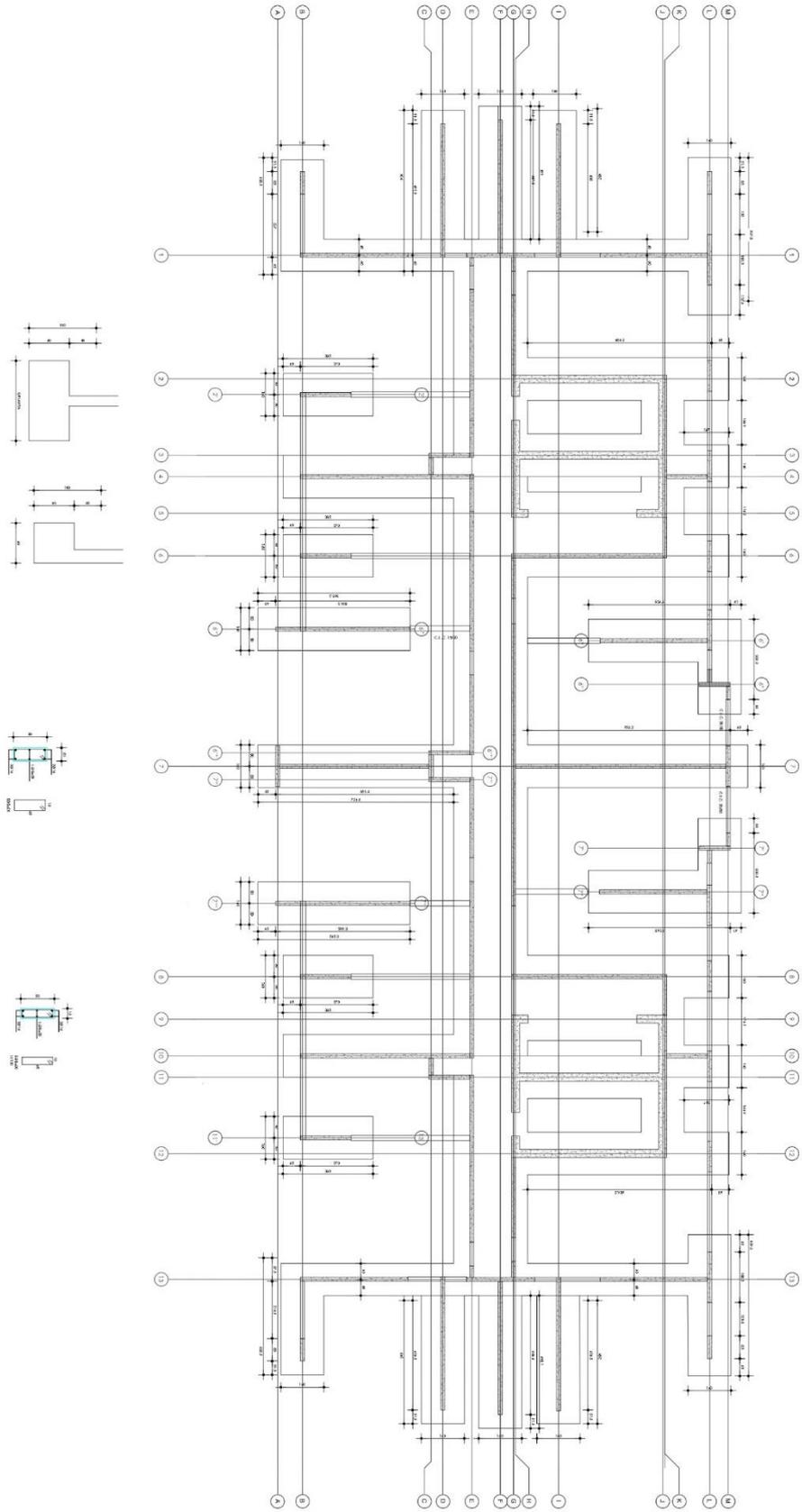


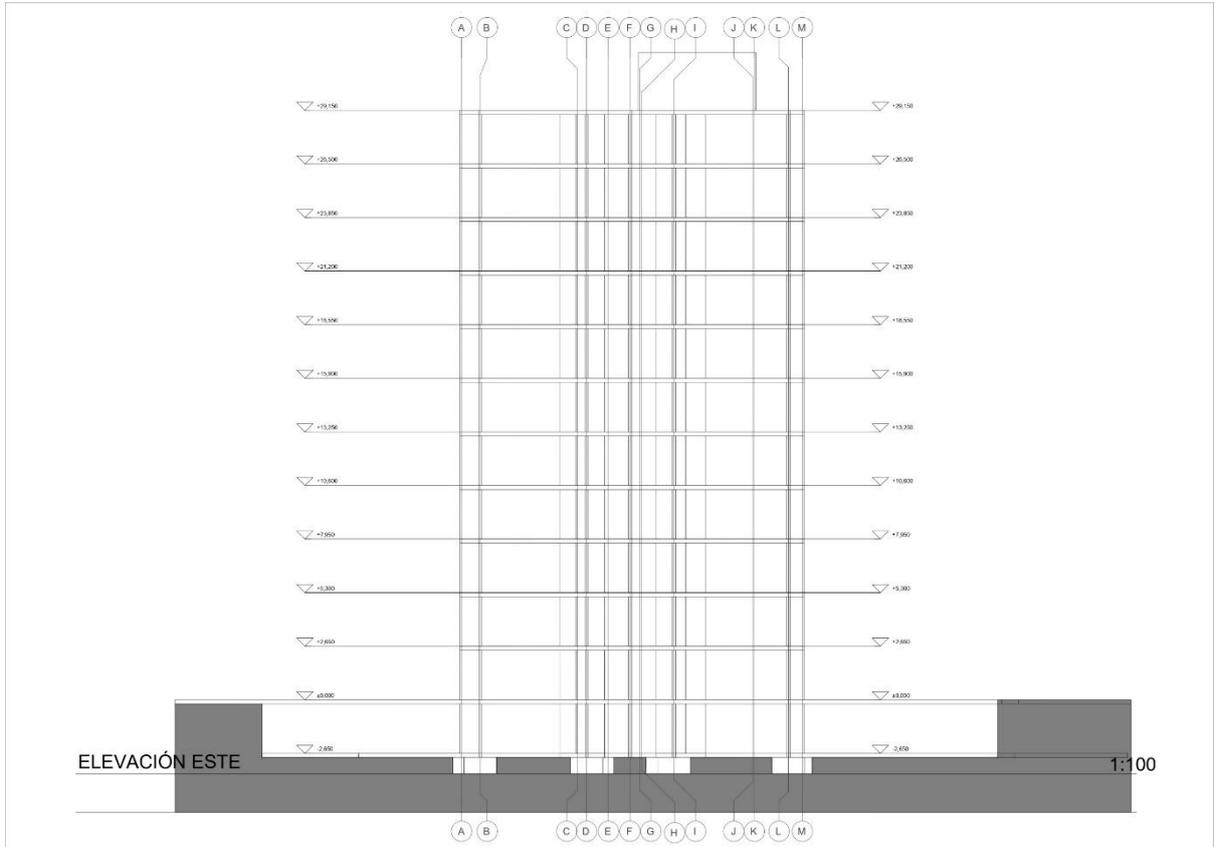
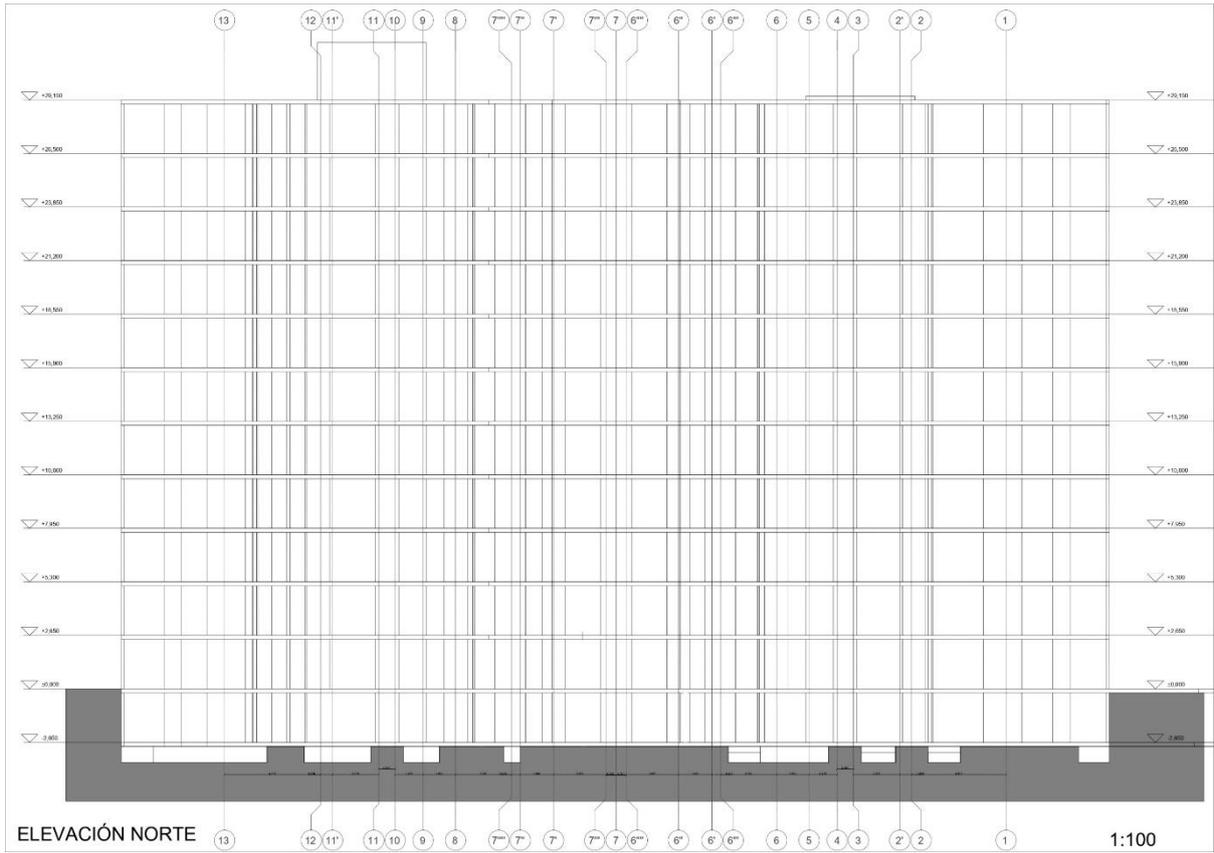
PLANTA

1:100



ESCALA 1/20
C.S.C. 20/50
C.S.C. 15/50





7.3 Anexo C – Iteración 2
Edificio con Sistema poste y Viga de LVL

