



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MÉTODO TRADICIONAL DE HORMIGÓN  
PREFABRICADO Y MADERA, CONSIDERANDO DURABILIDAD,  
RESISTENCIA AL FUEGO Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS EN EDIFICIOS  
DE MEDIANA ALTURA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**ALISON HILLARY ALIAGA VILLARROEL**

PROFESOR GUÍA:  
SALVADOR CORREA EYZAGUIRRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JORGE PULGAR ALLENDES  
MIGUEL ÁNGEL PÉREZ ARIAS

Este trabajo ha sido realizado en colaboración con:  
E2E S.A

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: **ALISON HILLARY ALIAGA VILLARROEL**  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: SALVADOR CORREA EYZAGUIRRE

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MÉTODO TRADICIONAL DE  
HORMIGÓN PREFABRICADO Y MADERA, CONSIDERANDO  
DURABILIDAD, RESISTENCIA AL FUEGO Y MÉTODOS  
CONSTRUCTIVOS EN EDIFICIOS DE MEDIANA ALTURA.**

En Chile, la mayoría de las edificaciones residenciales se realizan en hormigón, sin embargo, en la actualidad han surgido diversas opciones para fabricar edificios de mediana altura, como lo es la madera, la cual corresponde al segundo material de construcción más utilizado en el país, no obstante, su participación se ve disminuida a medida que aumenta la altura de la edificación. Es por esto que resulta interesante realizar un análisis comparativo que involucre su resistencia y eficiencia constructiva.

En esta memoria de título se tiene como propósito analizar y comparar la durabilidad, resistencia al fuego y proceso constructivo de la madera y el hormigón prefabricado, enfocándose en las edificaciones de mediana altura, y estableciendo ventajas y desventajas de cada material. Para la realización de este trabajo la empresa E2E, enfocada particularmente en la construcción de edificaciones sostenibles de última tecnología y precisión, proporciona planos de diseño, procesos constructivos y memorias de cálculo de un proyecto actual de un edificio de madera en mediana altura (4 niveles), para su posterior comparación con uno de hormigón prefabricado de similares características, propuesto por el autor.

Con la información recopilada se estudian los aspectos relevantes e inherentes a los edificios de mediana altura en madera y hormigón prefabricado, lo que permite determinar las diferencias entre sus comportamientos, así como también la eficiencia de sus respectivos métodos constructivos. Los resultados concluyeron que la madera es un material altamente competitivo en costos y tiempos, y que presenta ventajas sustanciales, como su resiliencia, su buen comportamiento térmico, acompañado de su bajo impacto ambiental, que marca la diferencia ante cualquier otro material de construcción y que resulta primordial para el desarrollo sostenible. Por su parte, el hormigón prefabricado presentó ventajas en su comportamiento al fuego, en la fiabilidad a la hora de la construcción, su buen comportamiento sísmico y su baja necesidad de mantención, sin embargo, esto viene acompañado de su importante impacto ambiental dadas sus altas emisiones de CO<sub>2</sub>.

Adicionalmente, se concluye que el fomento del uso de nuevas tecnologías aplica sin promover exclusivamente un material por sobre otro, sino que, apunta a la industrialización de la construcción en general, ya que entrega beneficios en la eficiencia de los procesos constructivos, en la disminución de generación de residuos y en la disminución de incertidumbres. Características que resultan clave para el aumento de la productividad y para solucionar el déficit habitacional.

*A quienes contribuyen en  
darle un respiro al planeta.*

**«Piensa globalmente, actúa localmente»**  
*René Dubois*

# Agradecimientos

Para comenzar, agradezco a mi abuela, quien, a pesar de no encontrarse físicamente, se encuentra siempre en mis pensamientos y motivaciones. Gracias por criarme, cuidarme, enseñarme e impulsarme a estudiar constantemente.

A mi familia, por soportarme y apoyarme en mis peores y mejores versiones, desde el máximo estrés hasta la mayor alegría. Además, por confiar en mis capacidades y estimular mi interés por la ingeniería.

A mis amigos, tanto a los que estuvieron como a los que están, por hacer amena mi estadía en este largo proceso universitario y por motivarme cuando no me creía capaz.

A esa persona especial, que me apoyó en todo el proceso de la memoria, aclarándome ideas y compartiéndome su experiencia.

Agradezco a toda la comisión por guiarme en el desarrollo de este trabajo, en especial a Salvador C. y Sebastián Z. de E2E por el tiempo dedicado a resolver dudas y complementar el trabajo. A Sebastián P. del CIM por su participación activa y por facilitarme información relevante. Y finalmente a todos los académicos de la Universidad de Chile que se tomaron un tiempo para oír mis dudas y formarme profesionalmente.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.3. Metodología . . . . .	2
1.4. Resultados esperados . . . . .	2
<b>2. Marco teórico</b>	<b>3</b>
2.1. Términos y definiciones . . . . .	3
2.2. Actualidad nacional . . . . .	5
2.3. Caracterización de los materiales . . . . .	7
2.3.1. Madera . . . . .	7
2.3.2. Madera en la construcción . . . . .	11
2.3.3. Hormigón Prefabricado . . . . .	15
2.4. Marco Legal y Técnico . . . . .	18
2.4.1. Normativa Nacional . . . . .	18
2.4.2. Normativa Internacional . . . . .	20
<b>3. Evaluación de durabilidad y resistencia en edificaciones de mediana altura</b>	<b>21</b>
3.1. Caso de estudio . . . . .	21
3.2. Materiales . . . . .	22
3.3. Normas y documentos de referencia . . . . .	23
3.4. Definición de cargas . . . . .	24
3.4.1. Estáticas . . . . .	24
3.4.2. Sísmicas . . . . .	25
3.4.3. Viento . . . . .	27
3.5. Combinaciones de carga . . . . .	28
3.6. Diseño de la estructura . . . . .	29
3.6.1. Madera . . . . .	29
3.6.2. Hormigón prefabricado . . . . .	37
3.7. Durabilidad . . . . .	47
<b>4. Aspectos fundamentales de la resistencia al fuego</b>	<b>51</b>
4.1. Fundamentos de la resistencia al fuego . . . . .	51
4.2. Normativas nacionales e internacionales . . . . .	56
4.3. Ensayos de resistencia al fuego . . . . .	59

<b>5. Procesos constructivos en madera y hormigón prefabricado</b>	<b>61</b>
5.1. Método constructivo en materiales prefabricados . . . . .	61
5.1.1. Fabricación de los elementos . . . . .	61
5.1.2. Secuencia constructiva . . . . .	64
5.2. Cronograma . . . . .	69
5.2.1. Edificaciones en madera . . . . .	69
5.2.2. Edificaciones en hormigón prefabricado . . . . .	71
5.3. Costos . . . . .	73
5.3.1. Edificaciones en madera . . . . .	73
5.3.2. Edificaciones en hormigón prefabricado . . . . .	74
<b>6. Análisis comparativo</b>	<b>75</b>
6.1. Durabilidad y resistencia estructural . . . . .	75
6.2. Resistencia al fuego . . . . .	78
6.3. Procesos constructivos . . . . .	79
6.4. Otros ámbitos a considerar . . . . .	81
6.5. Percepción de estas edificaciones . . . . .	86
<b>7. Conclusiones</b>	<b>88</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>95</b>
<b>Anexos</b>	<b>97</b>
<b>A. Cálculo en madera</b>	<b>97</b>
<b>B. Cálculos de Impacto Ambiental</b>	<b>100</b>
<b>C. Encuestas</b>	<b>101</b>

# Índice de Tablas

3.1.	Materiales y dimensiones para el diseño en madera. . . . .	22
3.2.	Propiedades de los materiales para diseño en hormigón prefabricado. . . . .	23
3.3.	Sobre carga SC según NCh1537 Of.2009. . . . .	24
3.4.	Características de cada piso, según material. . . . .	24
3.5.	Peso sísmico total, según material. . . . .	24
3.6.	Parámetros sísmicos según NCh433 Of.2012. . . . .	25
3.7.	Período fundamental aproximado $T_a$ , coeficiente sísmico (C) y corte basal (Q) de cada material. . . . .	25
3.8.	Distribución fuerza sísmica por piso, según material. . . . .	26
3.9.	Fuerza de diseño del diafragma, según material. . . . .	26
3.10.	Parámetros, fuerza y corte por piso, considerados según la norma NCh432.Of2010.	27
3.11.	Combinaciones de carga según método a utilizar. . . . .	28
3.12.	Modelo flexible – Drift de entrepiso (%). (MdC-HdP). . . . .	30
3.13.	Modelo rígido – Drift de entrepiso (%). (MdC-HdP). . . . .	30
3.14.	Propiedades de muros. (MdC-HdP). . . . .	31
3.15.	Verificación de los PDI. . . . .	31
3.16.	Capacidad a corte según patrón de clavado. . . . .	31
3.17.	Capacidad a tracción de barras ATS. . . . .	32
3.18.	Capacidad a compresión PDB. . . . .	32
3.19.	Verificación de muros. . . . .	32
3.20.	Factor de utilización de la viga HILAM y el panel terciado. (MdC-HdP). . . . .	33
3.21.	Verificación corte en el plano en dirección x e y. (MdC-HdP). . . . .	34
3.22.	Verificación flexión en el plano en dirección x e y. (MdC-HdP). . . . .	34
3.23.	Verificación de colectores. (MdC-HdP). . . . .	34
3.24.	Conectores - Máxima capacidad admisible de extracción lateral. (MdC-HdP). . . . .	35
3.25.	Conexiones PDB-ATS (MdC-HdP). . . . .	35
3.26.	Conexiones de entrepiso. . . . .	36
3.27.	Periodos y participación de masa modal según Modelo ETABS. . . . .	38
3.28.	Corte elástico reducido y coeficiente de reducción. . . . .	38
3.29.	Excentricidad por análisis de torsión accidental. . . . .	39
3.30.	Desplazamientos normativos en entrepiso en el centro de masa. . . . .	39
3.31.	Desplazamientos normativos en entrepiso en un punto extremo. . . . .	40
3.32.	Verificación de los requerimientos normativos en muro T8. Fuente: Elaboración propia. . . . .	41
3.33.	Verificación de los requerimientos normativos en viga. Fuente: Elaboración propia.	42
3.34.	Opciones de losas prefabricadas. Fuente: Hormipret (2017) . . . . .	43
3.35.	Fallas comunes en estructuras de hormigón. . . . .	48
4.1.	Velocidades de carbonización, diversos trabajos. . . . .	55

4.2.	Resistencia al fuego requerida para los elementos de construcción de edificios tipo c. Fuente: OGUC . . . . .	56
5.1.	Tiempos referenciales de construcción en edificaciones de 5 pisos. Fuente: Informe CIM UC . . . . .	69
5.2.	Estimación de tiempo de montaje de paneles en el edificio en estudio. Fuente: Elaboración propia . . . . .	69
5.3.	Estimación preliminar. Fuente: David Campusano. . . . .	71
5.4.	Velocidad montaje (con cuadrilla de 4 personas)[9]. . . . .	71
5.5.	Estimación tiempo de montaje en el edificio en estudio. Fuente: Elaboración propia	71
5.6.	Costo Directo para madera. Fuente: Elaboración propia. . . . .	73
5.7.	Costo Directo para hormigón prefabricado. Fuente: Elaboración propia. . . . .	74
6.1.	Tabla recapitulativa sobre la durabilidad de los materiales. . . . .	77
6.2.	Tabla recapitulativa de resistencia al fuego (RF) . . . . .	78
6.3.	Coefficientes híbridos de energía incorporada para materiales de construcción chilenos. Fuente: Bunster 2020. . . . .	83
B.1.	Valores considerados para el ACV (por tonelada de material), donde las etapas A-C corresponde desde la obtención de la materia prima hasta su eliminación, y la etapa D corresponde a la reutilización y reciclaje (Montilla 2020). . . . .	100
B.2.	Pesos del caso estudio considerados para el ACV. . . . .	100
B.3.	Resultados para el cálculo de ACV. . . . .	100
C.1.	Interpretación de la puntuación asignada. . . . .	101
C.2.	Valores y resultados de las encuestas de percepción sobre madera y hormigón prefabricado. En naranja corresponde a madera, en gris corresponde a hormigón prefabricado, y en rosa corresponde a importancia. . . . .	101

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Superficie de plantaciones forestales nacionales, 2018[2]. . . . .	7
2.2.	Esquema de composición de la madera (MADERAS, s. f.). . . . .	8
2.3.	Detalle ampliado de componentes en sistema ATS[3]. . . . .	14
2.4.	Muro del sistema marco-plataforma con anclaje tipo Anchor Tie-Down System[3]. . . . . .	14
2.5.	Ejemplos de elementos de hormigón prefabricado. Fuente: Hormipret. . . . .	15
3.1.	Primer edificio del condominio/Fotografía E2E (izquierda) y planta primer piso edificio/MdC-HdP (derecha) . . . . .	22
3.2.	Comparación entre fuerzas sísmicas y de viento para la madera (MdC-HdP). . .	27
3.3.	Nomenclatura de muros (izquierda) y modelo BIM realizado por E2E (derecha). .	29
3.4.	Casetones y distribución de paneles, bloqueos y vigas cielo 1 (MdC-HdP). . . .	33
3.5.	Elementos de conexión de entrepiso muro perimetral cielo 1, 2 y 3. (MdC-HdP). .	36
3.6.	Modelo estructural realizado en ETABS. Fuente: Elaboración propia. . . . .	37
3.7.	Espectros de diseño elástico y reducidos. Fuente: Elaboración propia. . . . .	39
3.8.	Diseño de muro T8. Fuente: Elaboración propia. . . . .	40
3.9.	Diagrama de interacción muro T8. Fuente: Elaboración propia. . . . .	41
3.10.	Vista transversal viga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia. . . . .	42
3.11.	Detalle de conexión tipo CV1 (izquierda) y CV2 (derecha). Fuente: Aguirre 2021. .	44
3.12.	Detalle de conexión tipo CN1 (izquierda) y CN2 (derecha). Adaptado de Aguirre 2021. . . . .	45
3.13.	Detalle de conexión tipo CH. Fuente: Aguirre 2021. . . . .	45
3.14.	Disposición de las conexiones. Fuente: Elaboración propia. . . . .	46
3.15.	Refuerzos en ménsulas Fuente: NTIC. . . . .	46
4.1.	Temperatura alcanzada por el acero según su recubrimiento y en función del tiempo[5]. . . . .	53
4.2.	Disminución de las propiedades del hormigón frente a altas temperaturas[4]. . .	54
4.3.	Curva Tiempo-Temperatura, NCh935. . . . .	58
4.4.	Comparación entre curvas (CERFOGLI (2018)). . . . .	58
4.5.	Ensayo NCh 935/1, estructura entrepiso (a la izquierda) y muro (a la derecha). Fuente: Idiem, 2018. . . . .	59
5.1.	Secuencia constructiva de elementos prefabricados. Fuente: Elaboración propia. .	61
5.2.	Composición de muros (izquierda) y piso de entrepisos (derecha). Fuente: E2E. .	62
5.3.	Fabricación de elementos prefabricados de madera. Fuente: E2E. . . . .	62
5.4.	Fabricación de elementos prefabricados de hormigón. Fuente: CONQUAS 21. . .	63
5.5.	Primeros pasos de la secuencia constructiva de elementos prefabricados de ma- dera. Fuente: E2E. . . . .	64
5.6.	Primeros pasos de la secuencia constructiva de elementos prefabricados de hor- migón. Fuente: CONQUAS 21. . . . .	65

5.7.	Instalación de paneles verticales(4) y horizontales(5) de madera. Fuente: E2E.	66
5.8.	Instalación de paneles verticales(4) y horizontales(5) de hormigón. Fuente: CON- QUAS 21. . . . .	68
5.9.	Cronograma edificación en madera de 4 pisos. Fuente: Elaboración propia. . .	70
5.10.	Cronograma edificación en hormigón prefabricado de 4 pisos. Fuente: Elabora- ción propia. . . . .	72
6.1.	Drift de entrepiso en centro de masa (a) y en otro punto (b). . . . .	75
6.2.	Factor de utilización de los elementos de diseño. . . . .	76
6.3.	Comparación entre cronogramas de obras. . . . .	79
6.4.	Costos directos de obra y distribución de costos. . . . .	80
6.5.	Consumo de combustibles en transporte de materias primas. Fuente: Muñoz & Quiroz (2014). . . . .	81
6.6.	Equivalencias en desempeño de aislación térmica, variando el espesor. Fuente: Madera21. . . . .	82
6.7.	Alcances del ACV. Fuente: ZeroConsulting . . . . .	83
6.8.	Demanda acumulada de energía requerida según edificación. . . . .	84
6.9.	Impacto ambiental. . . . .	85
6.10.	Importancia asignada a cada característica. . . . .	86
6.11.	Resultados de la encuesta de evaluación de ambos materiales. . . . .	87
A.1.	Giro acumulado por piso por elongación del ATS. (MdC-HdP) . . . . .	97

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

En Chile, a partir del 2005 (según datos del ICH), el material de construcción más utilizado en muros de edificaciones tradicionales corresponde al hormigón, el cual ha ido en aumento con una participación que va del 39 % (enero 2005) al 69 % (diciembre 2021). Esto es ocasionado por la fiabilidad que este material aporta según su resistencia ante cargas estáticas y sísmicas. Sin embargo, la razón principal puede deberse muchas veces al desconocimiento de otras soluciones que sean confiables y garanticen el buen comportamiento de las edificaciones.

En la actualidad, se está incorporando el uso de la madera en la industria de la construcción de edificios de mediana altura, material el cual ya es ampliamente utilizado a nivel nacional en la construcción de casas (segundo material más utilizado) y validado en mediana altura a nivel internacional. Esto se evidencia en cifras del CIM (2016), donde se observa que el uso de la madera disminuye según el aumento de la altura de las edificaciones ya que en viviendas de hasta 2 pisos la madera ocupa el 45 % mientras que el hormigón el 60 %, y en viviendas de 3 a 4 pisos el 90 % son de hormigón mientras solo el 4 % corresponde a madera.

Por otra parte, algunas de las incertidumbres que involucran tanto a clientes como a ingenieros corresponden al comportamiento de las edificaciones de madera frente a incendios, sismos y solicitaciones, así como también, el proceso de diseño y construcción bajo todas estas premisas. En particular, se considera que, por temas de seguridad, la característica combustible de la madera es una de las principales dudas razonables relacionadas al diseño de este tipo de edificios. Respecto a este punto, cabe mencionar que existen investigaciones y avances a nivel mundial que apuntan hacia una construcción responsable en madera.

Adicionalmente, la madera posee diversas ventajas sobre el hormigón tradicional, entre las que se menciona su buena resistencia a flexión, su casi nula dilatación térmica que resulta clave en zonas con variaciones de temperatura considerables, y que de forma natural es un excelente aislante térmico y acústico. Sin embargo, puede poseer características que presentan desafíos en el diseño, como su baja densidad que hace que se traten de edificaciones livianas, lo que por una parte disminuye el corte basal y las dimensiones de las fundaciones, pero por otra, su propia flexibilidad hace necesario limitar la altura para el control de deformaciones. A su vez, esta última característica hace que este material sea resiliente ante cargas sísmicas.

Finalmente, se puede considerar que la madera es un material sustentable y al tratarse de un material prefabricado, considera menores tiempos de construcción y mayor rentabilidad. Sin embargo, es de notar que el proceso constructivo y mantenimiento de este material es fundamental para garantizar su durabilidad, aumentando los años de vida útil.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Analizar y comparar el método tradicional de hormigón prefabricado y madera, considerando durabilidad, resistencia al fuego, y métodos constructivos en edificios de mediana altura.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la durabilidad y resistencia estructural de un edificio de 4 pisos en madera, comparándolo con uno de hormigón prefabricado de similares características para garantizar un buen comportamiento ante cargas estáticas, de viento y sísmicas.
- Identificar los aspectos fundamentales de la resistencia al fuego en edificaciones y caracterizar las variables involucradas para establecer su comportamiento ante incendios.
- Describir los procesos constructivos de una edificación de mediana altura (4 pisos) en madera y hormigón prefabricado para evaluar la eficiencia en obra de ambas alternativas.
- Realizar un análisis comparativo entre una edificación de 4 pisos en madera y en hormigón prefabricado, según criterios de valor estructural, comportamiento, costos, plazos e impacto ambiental. Con el fin de identificar ventajas, desventajas y dar recomendaciones.

## 1.3. Metodología

1. **Revisión bibliográfica y normativa:** Se realizarán revisiones bibliográficas de todo el material proporcionado por la empresa E2E, así como de diversos autores referente a edificaciones de mediana altura en madera y hormigón prefabricado. Asimismo, se considerarán las normativas vigentes.
2. **Síntesis y procesamiento de la información:** Síntesis de la información según su ámbito, ahondando en los temas científicos. Se abordarán ecuaciones de cálculo estructural y se realizará un modelo computacional para la estructura de hormigón prefabricado, además se desarrollarán cronogramas y presupuestos en ambos materiales.
3. **Entrevistas a ingenieros** encargados del diseño de edificaciones de mediana altura sobre los procesos y métodos que utilizan para la realización de sus proyectos.
4. **Análisis de resultados** Mediante un análisis crítico y comparación de los resultados obtenidos se evaluarán ambas alternativas constructivas mostrando las ventajas y desventajas de su uso.

## 1.4. Resultados esperados

A través de este análisis comparativo se espera obtener bases científicas que avalen la durabilidad y la resistencia al fuego de las edificaciones en madera, y un análisis de los métodos constructivos de ambos materiales, de manera de que sus eficiencias puedan ser comparadas.

# Capítulo 2

## Marco teórico

En este capítulo se presenta una síntesis del estado del arte sobre la madera y el hormigón prefabricado en las construcciones nacionales. Para esto se consideran 4 secciones, en la primera sección se abordan definiciones y términos útiles para comprender el presente documento. La segunda sección describe brevemente la actualidad nacional con respecto a la industrialización en la construcción. La tercera sección corresponde a una caracterización de los materiales a analizar y, por último, se presenta la normativa legal y técnica para el diseño de edificaciones en estos materiales.

### 2.1. Términos y definiciones

- **Carbonización:** Proceso que tiene por efecto la reducción de un material a carbón producto de la combustión.
- **Condiciones higrotérmicas:** Condiciones de temperatura seca y humedad relativa que prevalecen en los ambientes exteriores e interiores para el cálculo de las condensaciones superficiales e intersticiales.
- **Contenido de humedad de la madera:** Relación (en porcentaje) entre la masa de agua en la madera a la masa de la madera seca o anhidra.
- **Creep:** Tendencia de un material sólido de deformarse de forma permanente bajo la influencia de la presión.
- **Diafragma:** Elemento estructural, de pequeño espesor en relación con sus otras dos dimensiones, que es capaz de resistir sollicitaciones de cizalle y posee una rigidez suficiente para limitar las deformaciones de la estructura hasta cierto valor permisible.
- **Diafragma flexible:** Corresponde al diafragma que distribuye los cortes de piso a los muros según áreas tributarias. Este no es capaz de transmitir torsión a los elementos resistentes y al curvarse tiene diferentes desplazamientos, deformaciones y rotaciones que se incluyen en el análisis.
- **Diafragma rígido:** Corresponde al diafragma que distribuye los cortes según las rigideces laterales relativas de los muros. Este no cambia su forma en planta cuando se somete a cargas laterales ya que puede transmitir el desplazamiento a otros elementos como muros, los cuales se desplazarán todos a la vez y de igual forma.

- **Elemento de estructura:** Todo elemento resistente u orgánico de una construcción, como cimientos, muros soportantes, suelos, pilares, techumbres, torres y otros análogos.
- **Elementos industriales para la construcción:** Piezas preparadas en fábrica para ser empleadas en obras, como bloques de hormigón, de cal y arena, de yeso, paneles de muro de madera u otros materiales.
- **Estudio de la masividad de una estructura:** Análisis de la relación entre la superficie expuesta al fuego y el volumen de la estructura del edificio, es decir, mide la mayor o menor facilidad que tiene la estructura para verse afectada por la acción del fuego.
- **Higroscopividad:** Propiedad de algunas sustancias de absorber y exhalar la humedad según el medio en que se encuentran.
- **Huella de carbono:** Conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO2 equivalentes.
- **Ignición:** Acción de desencadenar la combustión de un cuerpo, y/o proceso químico en el que una sustancia permanece en combustión.
- **Impregnación:** Técnica utilizada para proteger la madera contra su deterioro y destrucción, mediante la saturación de sus fibras con una mezcla química de preservantes, retardantes de fuego o ambos.
- **OSB:** Tableros de virutas orientadas encoladas a presión, que según los tratamientos y aditivos a los que se sometan, tienen uso en estructuras de carga, interiores y decoración.
- **Sistemas sismorresistentes:** Corresponden a sistemas diseñados y construidos con una adecuada configuración estructural, con componentes de dimensiones apropiadas y materiales con una proporción y resistencia suficientes para soportar la acción de las fuerzas causadas por sismos frecuentes.
- **Temperatura de ignición:** Mínima temperatura a la cual una sustancia inflamable emite suficientes vapores que, en presencia de una llama, pueden inflamarse.
- **Terciado estructural:** Tablero de gran estabilidad y resistencia mecánica, elaborado en base a chapas o láminas de madera prensadas entre si. Su uso es ideal para chapas o láminas en aplicaciones constructivas de tipo estructural, tanto en interiores como exteriores.
- **Viga I-Joist:** Son vigas rectas de gran longitud y resistencia, compuestas por dos alas de madera y un alma de OSB, unidas y prensadas con adhesivos para conformar vigas estructurales con forma de doble T o I.
- **Vivienda:** Edificación o unidad destinada al uso habitacional.

## 2.2. Actualidad nacional

### Industrialización y déficit habitacional

La **construcción industrializada, prefabricada o premoldeada** se caracteriza por elementos manufacturados en fábricas o plantas industriales, bajo un sistema de control, que posteriormente son ensamblados y montados en la obra. Históricamente, el prefabricado en Chile nace como la solución a una necesidad de vivienda que va de la mano con los planes habitacionales del gobierno de turno. En abril de 1939 se funda la CORFO con el fin de impulsar la industrialización nacional mediante la intervención del Estado, en una época en que imperó el proteccionismo económico a raíz de la Gran Depresión de 1930.

La industria nacional del prefabricado se ha basado principalmente en la utilización de madera como materia prima, y así como la madera se ha estado potenciando en los últimos años en la construcción, el concepto y la práctica de construcción industrializada a través de la prefabricación también ha sido tomado de a poco por la industria, utilizando también materiales como el hormigón y el acero.

Entre los beneficios de la prefabricación se encuentra que al tratarse de fabricación en ambientes controlados, aumenta la eficiencia de los procesos y del uso de los materiales, por ende, se disminuye la generación de residuos. Adicionalmente, permite aumentar la calidad y precisión de los componentes, y como se puede alcanzar un mayor control de los programas, se puede secuenciar la fabricación, el almacenaje y el transporte para minimizar el trabajo en obra, disminuyendo incertidumbres.

Los beneficios anteriormente mencionados van de la mano con los intereses de las empresas, las cuales van variando y mejorando sus metodologías, en la búsqueda de la eficiencia de los procesos y la disminución de plazos y costos. A su vez, los avances en las modelaciones 3D, BIM (building information modelling), softwares de diseño asistido por computadora y de manufactura asistida por computadora (CAD/CAM), hacen la prefabricación todavía más fácil y conveniente. Por lo que, bajo estas mismas premisas, la prefabricación a nivel internacional se está impulsando de igual manera, lo que se puede evidenciar con instituciones como el American Wood Council publican boletines con el objetivo de fomentar tanto la industrialización como la construcción en madera.

Es de conocimiento público la existencia de un **déficit habitacional** nacional y a su vez, una creciente densificación de las ciudades a lo largo del país es por esto que surge la necesidad de aumentar la productividad en el sector de la construcción dada las necesidades de vivienda social. En 2017, el déficit cuantitativo nacional se estimaba en 397.613 unidades y el cualitativo podía llegar a superar las 1.303.484 unidades (INE 2017). Estos números han ido en aumento ya que, según un estudio realizado por la Corporación Déficit Cero y el Centro de Políticas Públicas de la Universidad Católica, en abril de 2022, el déficit habitacional nacional alcanza 641.421 viviendas, convirtiendo el panorama actual en una de las peores crisis de acceso a la vivienda de las últimas décadas.

Para avanzar en la agenda de desarrollo urbano sostenible del país, se deben considerar desafíos como: la provisión de vivienda para una población creciente, el cambio climático provocado por la industria de la construcción y de los productos de la construcción, y la implementación acciones rápidas y adecuadas.

A modo referencial, en Chile se construyen entre 90 y 120 mil viviendas nuevas al año. El material predominante corresponde al hormigón, con un 56 %, seguido por la madera con un 13 % (2018).

Complementando, algunas cifras interesantes entregadas por el **Centro de Innovación en Madera CIM UC CORMA** indican que:

- < 1 % de los edificios de mediana o mayor altura se construyen usando madera en su estructura. Además, los edificios de 3 y 4 pisos son los que presentan mejores costos competitivos dentro del mercado nacional, ya que sus menores plazos de construcción, mayor productividad y desempeño térmico a largo plazo pueden generar un ahorro de hasta 53 % en costos operacionales.
- 18.1 % de las nuevas viviendas se construyen utilizando madera y 32 % de las viviendas existentes en Chile son de madera. Además, existe un aumento exponencial en el número de construcciones en madera, alcanzando alrededor del 20 % de los edificios construidos actualmente.
- Construir con madera podría reducir el déficit cuantitativo de viviendas en nuestro país de 772.000 a 397.613 en 25 años.

## Huella de carbono

Otro aspecto relevante a mencionar es el contexto medioambiental mundial en el que estamos todos involucrados. Nos encontramos frente a un fuerte cambio climático producto del calentamiento global y los gases de efecto invernadero (GEI), por lo que surge la necesidad de **reducir la huella de carbono** en las diversas áreas del desarrollo, lo que incluye a la construcción. En esta línea, el hormigón corresponde al material de construcción más utilizado en el mundo. Por una parte, la industria del hormigón utiliza 1.6 billones de toneladas de cemento cada año, y cada una de estas toneladas emite 1 tonelada de  $CO_2$  a la atmósfera, el cual corresponde al principal gas productor del efecto invernadero. En el caso chileno, el sector de la construcción es responsable de cerca del 17 % de las emisiones de  $CO_2$  (2018) y el 22 % de la energía total consumida se utiliza en la operación de edificaciones (2018) [1].

Es por esto que Chile ha asumido compromisos frente al cambio climático, entre los que se mencionan:

- En 2015, Chile asumió el compromiso de reducir un 30 % la intensidad de sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para el año 2030 en comparación con los niveles de 2007 (CEPAL OCDE, 2016). Esta agenda fue encomendada al Ministerio del Medio Ambiente de Chile (MMA), quien guía los esfuerzos de política pública en esta línea.
- En el marco del Acuerdo de París, Chile se ha comprometido a alcanzar la carbono neutralidad al año 2050 y llegar a un pico de emisiones de gases de efecto invernadero el año 2027. Para alcanzar la carbono neutralidad a 2050 se considera que una de las estrategias más costo-efectivas es descarbonizar el sector de la edificación.
- Se crea el programa Construye2025 impulsado por CORFO que busca transformar al sector construcción desde la productividad y la sustentabilidad, para lograr un desarrollo nacional impactando en forma positiva en los ámbitos social, económico y medioambiental.

Recopilando esta información referente al contexto chileno, y en búsqueda de un desarrollo sustentable del país, es que se realiza este trabajo de título, que da enfoque por una parte al uso de la madera como elemento estructural, así como también a un material constructivo altamente utilizado, pero en su versión industrializada, como lo es el hormigón prefabricado.

## 2.3. Caracterización de los materiales

### 2.3.1. Madera

Por definición, la madera corresponde al material extraído del tronco de los árboles que se utiliza en muchos elementos constructivos y también como combustible. Históricamente, se puede considerar a la madera (junto con la piedra) como uno de los primeros materiales de construcción del que dispuso el hombre, ya que además del uso como combustible y como arma defensiva, se utilizó en cabañas con estructura de madera y cubierta de ramas que proporcionaban una defensa contra la intemperie. Dando paso a su utilización en puentes y barcos.

### Recurso Forestal

A nivel mundial, según un informe realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) en 1994, se reportó una producción mundial de madera de 3358 millones de  $m^3$  de los cuales un 56 % corresponde a madera no industrial (1891 millones de  $m^3$ ) y un 44 % a madera industrial (1467 millones de  $m^3$ ). Adicionalmente, en un informe realizado por FAO en 1998, se publicó que las superficies de plantación forestal de los países en desarrollo de América Latina hasta 1995 fueron aproximadamente 9.960 millones de hectáreas de las cuales cercano a un 80 % corresponde a superficie industrial y un 20 % a no industrial.

En particular para el caso de Chile, según el informe forestal 2020 realizado por el Instituto Forestal (INFOR), el recurso forestal correspondiente a bosque nativo y plantaciones forestales cubría una superficie de 18.04 millones de ha en 2019, lo que representa el 23,7 % de la superficie nacional (calculada en 76,2 millones de ha). Respecto a las plantaciones forestales, la última cifra disponible (diciembre de 2018) indica que las de pino radiata cubren la mayor parte de esta superficie, con el 55,8 %, seguidas por plantaciones de eucaliptos con el 37,2 %, donde destacan *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*, como se puede observar en detalle en la Figura 2.1.

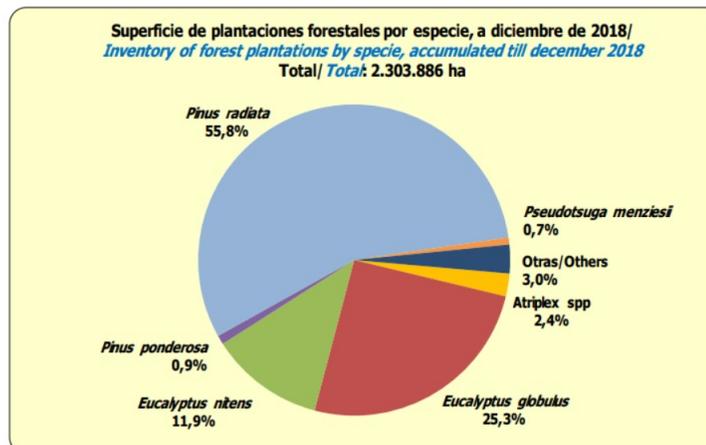


Figura 2.1: Superficie de plantaciones forestales nacionales, 2018[2].

## Composición de la madera

La madera es una formación celular compuesta fundamentalmente por dos elementos: celulosa y lignina. La celulosa es un polisacárido que forma la pared de las células vegetales y la lignina es un polímero natural que aporta rigidez a la planta. Por otra parte, la madera está compuesta principalmente por carbono y oxígeno en un 50 y 44 % respectivamente.

Al realizar un corte transversal al árbol se pueden diferenciar a simple vista algunas partes de la madera, la cuales desde el interior al centro corresponden a (ver Figura 2.2):

- **Corteza exterior:** Protege y aísla a los tejidos del árbol de los agentes atmosféricos y evitando un endurecimiento excesivo de la capa inmediata.
- **Líber :** También conocida como como corteza interior o floema, se encarga de transmitir los productos alimenticios (savia) a cada una de las partes constitutivas del árbol.
- **Cambium:** Corresponde a la capa de desarrollo del tronco. Las células del cambium forman hacia dentro las células de la madera y hacia afuera las del líber mediante división celular, lo que se convierte igualmente en el factor de crecimiento, tanto en espesor como en altura. Esta división celular se logra gracias a las hormonas (auxinas) que se fabrican a través de las yemas de las hojas, en cuanto aquellas empiezan a abrirse en primavera. El resultado de este desarrollo se refleja en los anillos anuales de crecimiento, sin embargo, en zonas tropicales, como la actividad vegetal es continua, no se aprecian estos anillos.
- **Albura:** Corresponde a la madera joven que contribuye a la conducción del agua en el árbol.
- **Duramen:** Corresponde al elemento que sostiene al tronco, las fibras de celulosa quedan retenidas mediante lignina y forman el armazón de soporte del tronco del árbol. Está formado por madera dura y consistente que, con el paso del tiempo, en la mayoría de los árboles, acaba siendo un material muerto, pero conservando su estabilidad.
- **Médula y radios medulares:** Es la zona ubicada justo en el centro del tronco y normalmente de color más oscuro, formada por secado y resinificación, su función es la de transportar nutrientes a lo largo del árbol, no tiene aprovechamiento como madera. Al conjunto formado por las capas internas (albura, duramen y médula) se le llama xilema.

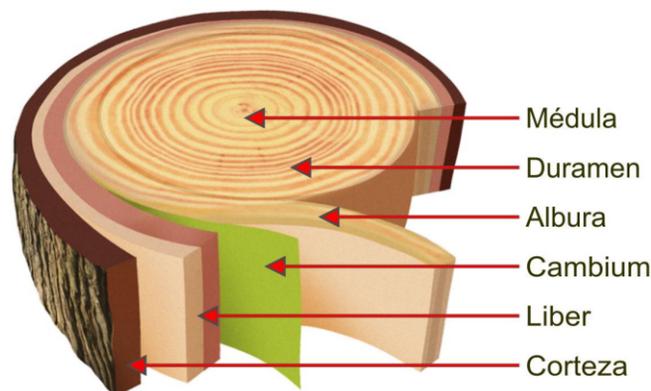


Figura 2.2: Esquema de composición de la madera (MADERAS, s. f.).

## Propiedad higroscópica

La higroscopicidad es una propiedad importante de la madera que debe entenderse para garantizar la durabilidad de los productos de madera. La humedad se incorpora a las paredes celulares, lo que redundará en cambios de volumen, es decir, hinchamiento y contracción. Para comprender este fenómeno se debe considerar que la madera puede contener agua libre en los huecos del interior de las células y agua absorbida por las paredes celulares. Cuando el contenido de humedad de la madera es máximo, el agua está presente en ambas formas, en cambio, cuando la madera se seca, primero pierde el agua libre en las cavidades y luego el agua absorbida por las paredes celulares. El punto de saturación de la fibra es el contenido de humedad límite en el que ya no hay agua libre en los huecos, mientras que el agua absorbida por las paredes celulares es máxima. Cuando la madera se encuentra bajo este punto, la evaporación del agua de las paredes celulares provoca una contracción del material proporcional a la pérdida de humedad. La contracción longitudinal es prácticamente insignificante mientras que la contracción radial y tangencial es mucho más evidente. Luego, con el tiempo, se establece en el área higroscópica de la madera, un contenido de humedad, que se encuentra en equilibrio con el clima circundante (HEH).

## Durabilidad

La madera puede ser susceptible a deteriorarse y descomponerse frente a 2 tipos de agentes:

- **Agentes biológicos:** Hace referencia a hongos de pudrición, manchas y mohos, escarabajos (larvas), termitas y horadadores marinos.
- **Agentes abiológicos:** Hace referencia a la exposición a la intemperie, desgaste por uso, ambientes con agentes químicos, temperaturas elevadas y fuego.

Para evitar el deterioro del material se deben contemplar medidas de protección adecuadas, por ejemplo, para el caso de una exposición prolongada al agua o a fuentes de humedad, se puede influir en el contenido de humedad diseñando detalles constructivos que limiten el contacto directo de los elementos de madera o se pueden proporcionar conexiones que faciliten el drenaje del agua y el secado rápido de la madera. Respecto a la protección contra el ataque de hongos e insectos, se puede lograr desde un principio, usando maderas de especies que posean gran durabilidad natural, la cual se debe a que el duramen queda impregnado con sustancias químicas que son eficaces preservadores. Por otra parte, para las especies que no poseen esa durabilidad natural, existen soluciones preservadoras que se aplican mediante el método de impregnación de la madera por medio de brochas, sumergiendo la madera en pilas que tengan la solución, o colocándolas en cámara de presión que es el método más eficiente, ya que el preservador penetra por los poros de la madera hasta la parte interior de ésta, llenando todas las células con dicha solución. Uno de los tratamientos más utilizados en Chile corresponde al uso de CCA (Óxidos de Cromo - Cobre - Arsénico), el cual se ha prohibido en varios países por su composición química por ser peligroso y dañino tanto para el ser humano, como para los animales. Adicionalmente, existen otros preservantes utilizados como: Licor BS (Borosilicato) y LOSP (Light Organic Solvent Preservatives).

## Comportamiento térmico

En general, la transmisión de calor dependerá de la humedad, del peso específico y de la especie. No obstante, se efectúa mejor la transmisión en la dirección de las fibras que en las direcciones perpendiculares a ésta. Algunas de las propiedades térmicas más relevantes de la madera son:

- **Conductividad térmica:** Se refiere a la medida de la proporción de calor que fluye a través de la unidad de espesor de un material que es sometido a un gradiente de temperatura. En el caso de la madera, la conductividad térmica es significativamente menor a la de los metales utilizado en la construcción. Esta propiedad aumenta cuando disminuye el contenido de humedad, la temperatura, contenido extractivo o la densidad, adicionalmente se ve afectada por siete factores básicos: la dirección de la fibra, los nudos, el ángulo de la fibra y la temperatura.
- **Calor específico:** Esta propiedad térmica se refiere a la cantidad de energía necesaria para incrementar una unidad de masa y una unidad de temperatura. En el caso de la madera, depende del contenido de humedad y la temperatura que esta posea. Para la madera seca, su valor es aproximadamente relativo a la temperatura, en cambio, cuando la madera tiene agua, el calor específico aumenta pues el calor específico del agua es mayor que es de la madera seca.
- **Coefficiente de expansión térmica:** El coeficiente de expansión térmica es la medida del cambio en las dimensiones causado por el cambio de temperatura. La madera que contiene humedad reacciona diferente a la variación de temperatura que la madera seca. Para el caso de la madera totalmente seca, esta se expande con el calor y se contrae con el frío, por otra parte, para el caso de la madera húmeda ante el calor, tiende a expandirse por la normal de expansión térmica, mientras que se contrae debido a la pérdida del contenido de humedad, trayendo como consecuencia que el cambio dimensional sea negativo.

## Tipos de madera

Los tipos de madera según su dureza se presentan a continuación:

- **Madera Dura:** Se caracterizan por un crecimiento lento, ser aceitosos, preceder de hojas caducas y tener más irregularidades. Dado esto son más difíciles de manejar y sus productos son más caros. Como ejemplo se tienen: roble, caoba, nogal, ébano, cerezo, entre otros.
- **Madera Blanda:** Se caracterizan por un ser de rápido crecimiento, tener color claro, preceder de hojas en forma de aguja y ser más fáciles de manejar. Dado esto se utilizan como materia prima para hacer papel. Como ejemplo se tienen: álamo, sauce, acacia, pino, entre otros.

Los tipos de madera según su procedencia se presentan a continuación:

- **Maderas Latifoliadas:** Son las más frecuentes en la fabricación de muebles y revestimientos de madera, crecen en las zonas templadas y tropicales. Al contrario de las maderas coníferas, presentan un bajo contenido en resinas. Tales como de Roble, de Encina, de Castaño, de Eucalipto, de Sauce, entre otros.

- **Maderas Resinosas o Coníferas:** La mayoría pertenecen a la subdivisión de maderas blandas, crecen en las zonas frías y templadas. Son las más utilizadas en construcción y carpintería, ya que proporcionan las mejores calidades de madera de construcción, en cuanto se refiere a características de trabajo y resistencias mecánicas. Presentan un elevado contenido en resinas. En esta clasificación, se encuentran todas las variedades de pinos, así como también la madera de Abeto, Alerce, Ciprés y Cedro.
- **Maderas de Árboles Frutales:** Maderas procedentes de árboles frutales, tales como de Nogal, de Cerezo y de Olivo.
- **Maderas Tropicales:** De procedencia de bosques tropicales muy diversos y origen en zonas tropicales de América, África y Asia. Tales como madera de Caoba, de Ébano, de Embero, de Iroko, entre otras.

### 2.3.2. Madera en la construcción

A la hora de utilizar madera como elemento estructural, se deben tener en consideración aspectos fundamentales de sus propiedades mecánicas, como las que se detallan en esta sección. Cabe tener en consideración que existen diversos factores que condicionan las propiedades mecánicas, como lo son los factores inherentes (especie, densidad, nudosidades, inclinación de la fibra), así como también los factores ambientales (contenido de humedad, temperatura, tiempo).

#### Anisotropía

La madera está formada por un conjunto de células orientadas en la dirección longitudinal del crecimiento del árbol, lo que le permite soportar las principales tensiones durante su crecimiento, por lo que sus propiedades físicas y mecánicas no son las mismas en todas las direcciones que pasan por un punto determinado. La resistencia paralela a la fibra, tanto en compresión como en tensión, es considerablemente mayor que la resistencia perpendicular a la fibra. Se pueden definir tres direcciones principales: axial que es paralela a la dirección de crecimiento del árbol, radial que es perpendicular a la axial y corta el eje del árbol y tangencial que es normal a las dos direcciones anteriores.

#### Compresión y tracción paralela a la fibra

Debido a la orientación de sus fibras, la madera tiene muy buena resistencia a los esfuerzos de compresión y tracción paralelos a la fibra. Sin embargo, la posibilidad de pandeo de un miembro largo y delgado puede reducir la resistencia a la compresión, por lo que la rotura en compresión debe considerarse en el diseño de los miembros portantes, donde se verifica por separación de columnillas de madera y pandeo individual de éstas. Por otra parte, la rotura en tracción se produce de forma súbita, comportándose la madera como un material frágil.

#### Compresión normal a la fibra

Este tipo de tensiones es característico de las zonas de apoyo de las vigas y de conexiones, donde se concentra la carga en pequeñas superficies que deben ser capaces de transmitir los esfuerzos, es por esto que usualmente se utilizan placas de acero o de madera para aumentar la superficie de apoyo y así reducir estas tensiones.

## Tracción perpendicular a la fibra

Dada la anisotropía de este material, las tensiones de tracción generadas perpendicularmente a la fibra pueden provocar la rotura de la madera y causar un fallo repentino e imprevisible, lo que suele producirse cerca de los sistemas de conexión. Es por esto que resulta imprescindible un diseño adecuado de las conexiones, ya que limitarán la presencia de tensiones perpendiculares o proporcionará métodos para reforzar las zonas sometidas a tensión.

## Flexión

Un elemento sometido a flexión se deforma, produciéndose un acortamiento de las fibras superiores y un alargamiento de las inferiores. Al proyectar un elemento de madera sometido a flexión no sólo ha de tenerse en cuenta que resista las cargas que sobre él actúan, es necesario evitar una deformación excesiva, que provoque un agrietamiento en el material.

## Cizalle o Corte

Es la capacidad de resistir fuerzas que tienden a que una parte del material se deslice sobre la parte adyacente a ella. El esfuerzo cortante origina tensiones tangenciales que actúan sobre las fibras de la madera según diversos modos:

- Cizalle transversal: las fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo. El fallo se produce por aplastamiento.
- Cizalle longitudinal axial: el fallo se produce por el deslizamiento de unas fibras con respecto a otras en la dirección longitudinal.
- Cizalle rodante: el fallo se produce por rodadura de unas fibras sobre las otras.

## Otras propiedades mecánicas

- **Dureza:** Es la resistencia que opone el material a la penetración, rayado o desgaste. Se tiene que la dureza es mayor en el duramen que en la albura, y que es mayor para la madera vieja que la joven. Esta propiedad se relaciona con la facilidad de trabajo con las distintas herramientas.
- **Elasticidad:** El módulo de elasticidad en tracción es más elevado que en compresión. Esta propiedad varía con la especie, humedad, naturaleza de las solicitaciones, dirección del esfuerzo y con la duración de aplicación de las cargas.
- **Fatiga:** El límite de fatiga corresponde a la tensión máxima que puede soportar una pieza sin romperse. Las propiedades de fatiga de la madera pueden estar influenciadas por las especies, el lugar de origen, la densidad, el contenido de humedad y el tipo de carga aplicada.
- **Hendibilidad:** Resistencia que opone la madera al esfuerzo de tracción transversal antes de romperse por separación de sus fibras. Esta cualidad se evidencia al hacer leña, en cambio es perjudicial cuando la pieza ha de unirse por clavos o tornillos a otras adyacentes.

## Estructuras de soporte

Algunas de las estructuras de soporte de madera más utilizadas en el país, corresponden a las siguientes:

- **Madera Laminada Encolada:** Es un material estructural fabricado a través de la unión de segmentos individuales de madera, su nombre proviene de su proceso de fabricación el cuál reúne dos técnicas: la técnica de encolado y la técnica de laminación. Al ser encolados con adhesivos industriales, entrega una alta durabilidad y resistencia a la humedad, generando piezas de gran tamaño y formas únicas (que pueden ser arqueadas o curvas en vigas o pilares), lo que a su vez lo hace adecuado para su uso en vigas, pilares, pérgolas, techos, pasillos, escaleras, paneles y revestimientos. La conexión entre los diferentes elementos se puede realizar a través de pernos, pasadores, herrajes internos y placas externas. Es altamente utilizado en pórticos de momento y pórticos arriostrados.
- **Madera Laminada Cruzada:** El material consiste en tablones o laminillas de madera aserrada y encolada, donde cada capa es orientada perpendicularmente a la capa anterior. Al unir capas de madera (al menos 3) en ángulos perpendiculares, la rigidez estructural del panel se obtiene en ambas direcciones, lo que permite tener una buena resistencia a la tracción y compresión. Los paneles pueden funcionar como paredes, pisos, muebles, revestimientos y techos, y su grosor y longitud pueden adaptarse a las demandas de cada proyecto. La conexión entre los diferentes elementos se puede realizar a través de tornillos autoperforantes y hold-downs/ángulos de corte. Es altamente utilizado en núcleos estructurales, pórticos de columnas continuas y madera masiva.
- **Madera Aserrada, OSB, Terciado:** Corresponden a piezas de madera maciza obtenidas por aserrado del árbol, las cuales se utilizan en entramado ligero. La conexión entre los diferentes elementos se puede realizar a través de clavos y hold-downs/ángulos de corte.

## Sistema de marco-plataforma (Wood Frame)

Es un sistema estructural completo que combina resistencia a cargas gravitacionales, arrosamiento lateral y transmisión de fuerzas horizontales hacia los niveles inferiores y fundaciones (Rademacher 2006). Se conforma por muros de una altura y entrepisos sobre ellos, actuando como un par de elementos que se repiten consecutivamente en la altura. Para esto, los diafragmas verticales (que actúan como muros de corte) y los horizontales (que trabajan como diafragmas de piso o losas de entrepiso), deben encontrarse adecuadamente conectados dentro de la edificación.

Se diferencia del sistema Balloon Frame (característico de Estados Unidos) en que este último tiene muros de al menos dos pisos, y entrepisos conectados lateralmente a estos muros, y no sobre ellos.

## Anclajes ante cargas volcantes

Existen dos tipos de anclaje ante cargas volcantes son comúnmente utilizados:

- **Anclaje tipo Hold-Down (HD):** Corresponde a un sistema de anclaje típicamente metálico que se encuentran conectados a los pies derechos de borde o extremos de cada segmento de muro, tienen forma de canales o planchas de acero delgadas y sirven para restringir el levantamiento en la esquina inferior cada segmento.

- **Anclaje tipo Anchor Tie-Down System (ATS):** Corresponde a un sistema de anclaje que restringe el volcamiento de los muros de corte y transfiere las cargas de los diafragmas de techos, piso y muros hacia la fundación. Para esto, se instala una barra de acero en el interior de los muros estructurales, la cual es continua desde la fundación hasta el último piso. Sus componentes se detallan en la Figura 2.3.

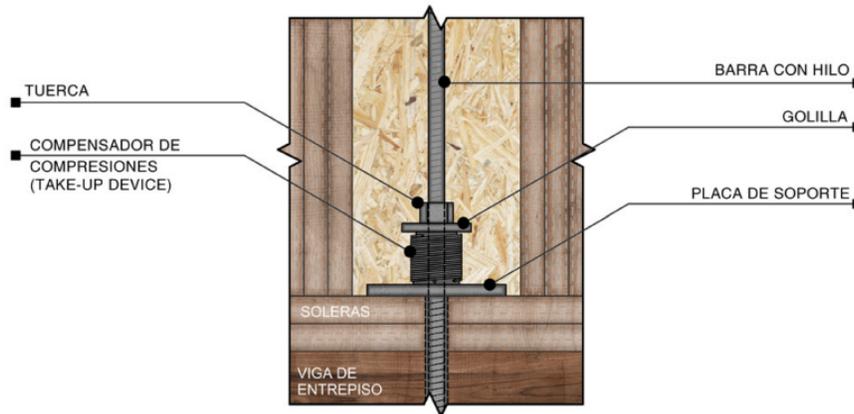


Figura 2.3: Detalle ampliado de componentes en sistema ATS[3].

En la Figura 2.4 se puede observar el tipo de muro del sistema marco-plataforma con un anclaje ATS, lo que corresponde al sistema utilizado en el caso estudio.

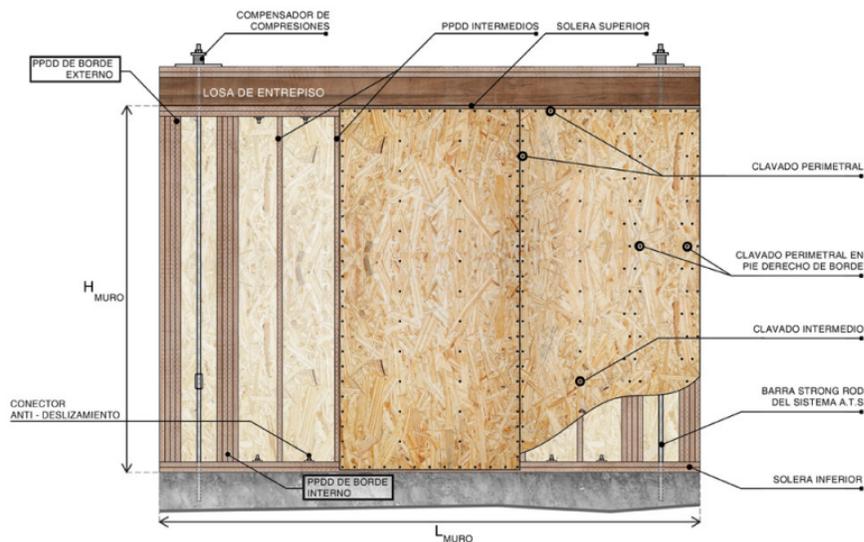


Figura 2.4: Muro del sistema marco-plataforma con anclaje tipo Anchor Tie-Down System[3].

### 2.3.3. Hormigón Prefabricado

Por definición, un elemento de hormigón prefabricado corresponde a una pieza de hormigón que ha sido moldeada y curada en una planta industrial o en otro lugar destinado a ello, diferente al sitio de su puesta en obra. El proceso de producción de estos elementos se puede dividir en dos fases: fabricación y moldaje. A grandes rasgos, los elementos prefabricados de hormigón se consiguen a través de un proceso de mezcla, vaciado y curado, en el cual, se utilizan moldes reutilizables. Esto se lleva a cabo usualmente en plantas industriales, para posteriormente (al ya estar curados), transportarlos a la obra. Ya en la obra se procede al montaje, el cual se puede hacer con grúas o manualmente, dependiendo de las características de los elementos prefabricados.

El prefabricado debe ser incluido en etapas tempranas de los proyectos y en el que involucrando todos los actores de la toma de decisiones: mandantes, constructores y diseñadores. Para mejorar el entendimiento y control del uso del prefabricado, y por ende mejorar la eficiencia de las obras, se deben definir ciertos estándares y consideraciones para el diseño, como la geometría de los elementos, ya que se deben unificar piezas e intentar disminuir la diversidad, para facilitar desmoldes, considerando las tolerancias de fabricación y montaje. También se debe considerar el tamaño y peso del elemento, ya que se pueden tener limitaciones por movimientos en la planta, para el transporte y en el uso de grúas para el montaje.

Algunas de las empresas dedicadas a la construcción con prefabricados, indican que las principales ventajas respecto a este método frente a la construcción tradicional son la factibilidad de la obra y la economía de la construcción. Por una parte, la fabricación es bajo condiciones de control de planta con personal especializado, existe mejora en los tiempos de ejecución y es viable en lugares de emplazamiento donde la construcción tradicional se dificulta o imposibilita. Por otra parte, la prefabricación será más ventajosa si el proyecto se orienta a utilizar una gran cantidad de elementos iguales o muy similares.

Los elementos de hormigón prefabricado, dada su versatilidad, se utilizan en distintos sectores como:

- En construcción civil: Se ven presente tanto como elementos estructurales: columnas, vigas, dovelas, dinteles, cimentación para edificaciones, entre otros. Así como también en elementos no estructurales: paneles de muros, coberturas de columnas, entre otros. Ver ejemplos en la Figura 2.5.
- En construcción vial: Se ven en forma de adoquines de hormigón para calzadas peatonales, marcos y bóvedas para pasos inferiores, vigas para puentes o para instalaciones hidráulicas, entre otros.



Figura 2.5: Ejemplos de elementos de hormigón prefabricado.  
Fuente: Hormipret.

## Clasificación de elementos prefabricados

Los elementos prefabricados pueden clasificarse comúnmente según:

- Su grado de prefabricación: Total y parcial. En el total se utiliza el “método de modelos” y se caracteriza por la construcción de la edificación en su totalidad en la fábrica y luego transportada al lugar definitivo. En el parcial, se utiliza el “método de elementos” y se realizan los cálculos, se diseñan y elaboran las piezas que van a formar parte de la edificación.
- Su función: Resistente, cerramiento y ornamental.
- Su peso: Livianos (menos de 30kg), semipesados (entre 30 y 500kg) y pesados (mayores a 500kg). Naturalmente, dado el peso del elemento, se determina la necesidad de trabajadores, medios mecánicos y/o maquinaria.
- Su material: Hormigón, Acero, concreto, aluminio, entre otros.
- Su forma: Lineales, bloques y paneles. Los elementos lineales son piezas esbeltas y largas de sección transversal reducida en relación con su longitud (vigas, columnas, pilotes). Los elementos de bloques son autoestables y no necesitan de apoyos auxiliares para su colocación (bloques de hormigón y bloques de ladrillo). Los elementos de paneles tienen una relación notable entre grosor y superficie y forman placas (placas de yeso, muros de contención, fachadas).

## Tipos de prefabricados

Existen dos tipologías concretas en los elementos de hormigón prefabricado: pretensado y postensado. En ambos se utilizan cables de acero denominados “tendones de refuerzo” para obtener una mejor resistencia y su diferencia se explica a continuación:

- **Pretensado:** Su principal característica es que la armadura de la pieza se tensa antes del hormigonado. Ya que su montaje es industrializado, esta tipología se asocia siempre de manera directa con los prefabricados de hormigón.
- **Postensado:** Su principal característica es que primero se realiza el proceso de hormigonado y después llega el momento de comprimir la armadura. En construcción, el hormigón postensado se utiliza como medio de unión, es decir, es una técnica con la que se construyen piezas continuas uniendo piezas prefabricadas de menor tamaño, por lo que es un método más usual in-situ.

## Conectores

Las características de las conexiones entre los miembros estructurales prefabricados influyen considerablemente en el desempeño sísmico de las estructuras al igual que las conexiones entre los miembros en la base y la fundación. Es por esto que para determinar qué tipo de conexión utilizar, ya que existen diversos tipos de conexiones para elementos prefabricados, se deben considerar tanto los requerimientos específicos del diseño de la estructura, como la normativa nacional. En particular, para sistemas sismorresistentes, se pueden considerar 2 clasificaciones según las características y desempeños de las conexiones (Kurama et al. 2018):

- **Conexiones emulativas:** Se caracterizan por su propósito, el cual vela para que el desempeño de la estructura prefabricada sea comparable al que tendría una estructura de hormigón construida in-situ equivalente. Existen 2 tipos: cuando la fluencia por flexión y la formación de rotulas plásticas se diseña para ocurrir en la junta entre los elementos prefabricados, se considera **dúctil** y cuando se diseña para ocurrir dentro de zonas específicas del elemento, lejano a las juntas, se considera **fuerte**.
- **Conexiones articuladas o no emulativas:** Se caracterizan por su propósito de concentrar las deformaciones no lineales de la estructura en los extremos de los elementos prefabricados y en las juntas, evitando a su vez, un comportamiento inelástico significativo (o daño).

Otras agrupaciones adoptadas internacionalmente consisten en:

- **Unión seca:** Se caracterizan por el empleo de soldadura o pernos asociados a insertos metálicos situados en los elementos a unir, por lo que el mortero que interviene es solo de protección. Estas conexiones son muy utilizadas debido a que son rápidas de ejecutar y comienzan a tomar cargas inmediatamente, por lo que aceleran el proceso constructivo.
- **Unión húmeda:** Se caracterizan por el uso de hormigón, el cual interviene de forma activa en la capacidad resistente de la unión. Su uso evita la discontinuidad en el trabajo estructural de los elementos, sin embargo, no trabaja estructuralmente hasta que el hormigón alcanza una resistencia mínima para su funcionamiento, por lo que retrasa proceso de montaje en obra.

## Montaje y transporte

El montaje y transporte de elementos prefabricados corresponden a procesos esenciales para llevar a cabo una adecuada construcción. Por una parte, resulta sustancial analizar alternativas de montaje y definir los equipos necesarios para esto, así como también tener en consideración que para el transporte de los elementos se debe verificar la ruta origen-destino, identificación la existencia de curvas cerradas, puentes con restricciones de peso, pendientes del terreno, accidentes geográficos, entre otros impedimentos mayores. Adicionalmente, se debe determinar la necesidad de permisos especiales y escoltas policiales cuando existe una sobredimensión y sobrepeso de las piezas, lo que tiene una incidencia directa en el plazo final. Algunas limitantes para este último aspecto (Decreto Supremo M.O.P. N° 158 de 1980), son:

- **Peso:** En Chile el peso total transportable es de 45ton, pero solamente se pueden transportar 30ton, ya que el camión más su tara pesan alrededor de 15ton. Para elementos de mayor peso se puede realizar siempre y cuando exista autorización de vialidad con escolta de carabineros.
- **Largo:** Sin permiso, se permiten hasta 18.6m y 20.5m para camiones con semirremolque y con remolque, respectivamente. Para largos mayores se requiere una autorización y por sobre 30m se requiere escolta policial.
- **Ancho:** Sin permiso, se permiten hasta 2.6m y por sobre 3.7m se requiere escolta policial.

## 2.4. Marco Legal y Técnico

En esta sección se describe de forma breve las normas, guías de diseño y otros documentos que son empleados como base para la construcción de edificaciones en Chile y el diseño de elementos estructurales de madera y hormigón prefabricado.

### 2.4.1. Normativa Nacional

En Chile, los parámetros relacionados propiamente a la construcción de edificios corresponden a los impuestos por el MINVU mediante la LGUC, esta Ley General contiene los principios, atribuciones, potestades, facultades, responsabilidades, sanciones, derechos y demás normas que rigen a los organismos, funcionarios, profesionales y particulares, en las acciones de planificación urbana, urbanización y construcción. A su vez, la LGUC deriva a la OGUC, la cual corresponde a la Ordenanza General que contiene las disposiciones reglamentarias de esta ley y regula el procedimiento administrativo, el proceso de planificación urbana, urbanización y construcción, y los estándares técnicos de diseño y construcción exigibles. Por último, esta ordenanza rige las Normas Técnicas que contienen y definen las características técnicas de los proyectos, materiales y sistemas de construcción y urbanización. En este ámbito, se originan las Normas Chilenas NCh, las que son elaboradas y aprobadas por el Instituto Nacional de Normalización, de cumplimiento obligatorio.

A continuación, se presentan algunas de las Normas Chilenas más relevantes en el ámbito de las edificaciones:

- **NCh433 Diseño sísmico de edificios:** Establece requisitos exigibles para el diseño sísmico de edificios, también se refiere a las exigencias sísmicas que deben cumplir los equipos y otros elementos secundarios de edificios. De modo general, se establecen las disposiciones de aplicación general que corresponden a: 1) la zonificación sísmica del territorio nacional, 2) El efecto del suelo de fundación y de la topografía en las características del movimiento sísmico, 3) Una clasificación de ocupación de edificios y otras estructuras de acuerdo a su importancia, uso y riesgo de falla, y 4) Instrumentos sísmicos. Así como también, se establecen disposiciones generales sobre diseño y métodos de análisis, con el fin de establecer el desplazamiento máximo entre pisos y el obtenido según el método utilizado (estático o modal espectral).
- **NCh1537 Diseño estructural de edificios - Cargas permanentes y sobrecargas de uso:** Establece las bases que permitan evaluar las cargas permanentes y cargas de uso que se deben considerar en el diseño de edificios y otras estructuras, considerando que los valores de las cargas de uso dadas en esta norma tienen el carácter de valores mínimos. Las disposiciones establecidas son aplicables a los edificios o partes de edificios que tienen los usos de bibliotecas, bodegas, cárceles, escuelas, estacionamientos, hospitales, oficinas, viviendas, entre otros explicitados dentro de la misma norma.
- **NCh3171 Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas:** Establece las disposiciones generales y requisitos mínimos, en relación a tipos de cargas y sus combinaciones, a considerar en el diseño de edificios y otras estructuras. Dentro de la misma, se abordan métodos de diseño por resistencia, diseño por condiciones de servicio, clasificación de los edificios y otras estructuras, entre otros.

Luego, en particular para las construcciones en madera, caben mencionar:

- **NCh819 Madera preservada - Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo:** Establece la clasificación de riesgo de deterioro que puede sufrir la madera de pino radiata y de otras especies, coníferas o latifoliadas, bajo condiciones de uso por el ataque de agentes biológicos, los requisitos de retención y penetración del preservante, y los criterios de muestreo. Se aplica para la preservación de madera de pino radiata y de otras especies, coníferas o latifoliadas, mediante procesos de impregnación industrial.
- **NCh1198 Madera - Construcción en Madera - Cálculo:** Establece los métodos y procedimientos de diseño estructural que determinan las condiciones mínimas que deben cumplir los elementos y las uniones en construcciones de madera aserrada, elaborada, laminada-encolada y postes de madera. Se aplica sobre la estructura de edificaciones corrientes de madera, elementos estructurales de madera en construcciones mixtas, andamiajes, moldajes, entibaciones, puentes, postes de madera, entre otros. De modo general, se establecen los puntos de: consideraciones de diseño, tensiones y módulos elásticos para la madera aserrada, factores de modificación, dimensionamiento de piezas estructurales, uniones en la madera estructural y madera laminada encolada.  
Actualmente esta norma se encuentra en proceso de revisión ya que se busca proponer un cambio que permita deformaciones mayores para edificios de madera (inicialmente con estructura de marco/plataforma) con muros de marcos de madera con placa arriostante. Principalmente porque el límite de deformación máxima de entrepiso que impone la norma sísmica NCh433 está pensado para estructuras de hormigón, lo que perjudica a estructuras más flexibles como edificios de estructura de muros de madera.
- **NCh1989 Agrupamiento de especies madereras según su resistencia - Procedimiento:** Establece el procedimiento que se debe seguir para agrupar las especies madereras que crecen en Chile, de acuerdo al promedio aritmético de las resistencias obtenidas en ensayos normalizados de probetas libres de defectos. Adicionalmente establece prescripciones que se aplican a las propiedades resistentes obtenidas de madera en estado verde, es decir, su contenido de humedad es  $\geq 30\%$ , y a las provenientes de madera en estado seco, es decir, su contenido de humedad es del  $12\%$ . Esta norma aplica tanto para maderas de coníferas como de latifoliadas.
- **NCh1207 Pino radiata - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad:** Establece los requisitos que debe cumplir cada pieza de madera aserrada o cepillada, seca (con un contenido de humedad menor o igual a  $19\%$ ) de pino radiata destinada a uso estructural, que se clasifica con un procedimiento visual. Las tolerancias dimensionales se deben ajustar a las especificaciones de la NCh2824 Materiales de construcción - Maderas - Pino radiata - Unidades, dimensiones y tolerancias. Adicionalmente, se definen tres grados dependiendo de las solicitaciones a las que serán sometidas las piezas estructurales, el grado GS corresponde a aquellas sometidas a grandes solicitaciones, el grado G1 es para vigas, pisos y entramados de techos, y el grado G2 es adecuado especialmente para tabiquerías de paredes estructurales. Las propiedades mecánicas admisibles asociadas a estos grados son los indicados en la NCh1198 mencionada anteriormente.

Por otra parte, respecto al hormigón prefabricado, este se menciona en el uso de construcciones estructurales, en la norma **NCh 2369 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales**, particularmente en su apartado 9.2 “Estructuras Prefabricadas de Hormigón” donde se indican los requisitos generales, las condiciones del diseño sísmico, las uniones y se referencia a la ACI 318-99 como guía para el diseño estructural. Adicionalmente en 2011 se publicó el Decreto número 60 - Reglamento que Fija los Requisitos de Diseño y Cálculo para el Hormigón Armado, donde se establece el recubrimiento mínimo de hormigón a la armadura pretensada y no pretensada para el hormigón prefabricado y modifica algunos requisitos de código ACI 318, con el fin de mejorar el desempeño sísmico de las estructuras sismo resistentes de hormigón.

## 2.4.2. Normativa Internacional

Las principales normas de diseño internacionales empleadas como base para el diseño estructural de edificaciones en madera con sistema de marco plataforma, y que serán referencia de la próxima versión de la NCh1198, corresponden a:

- **NDS National design specification for wood construction (2018)**: Es una norma americana, que dispone y define los métodos que deben emplearse en el diseño estructural de diversos elementos de madera (madera clasificada visualmente o mecánicamente, MLE, pilotes y postes de madera, CLT, entre otros). También define la práctica que debe seguirse en el diseño y la fabricación de conexiones apernadas.
- **SDPWS Special Design Provisions for Wind Seismic (2015)**: Es una norma americana, que dispone sobre los materiales, el diseño y la construcción de los elementos de madera, las fijaciones, y conjuntos para resistir las fuerzas del viento y sísmicas. Esta norma considera dos métodos de diseño: por tensiones admisibles (ASD), y por factores de carga y resistencia (LRFD). Ambos métodos deben estar de acuerdo con la norma NDS señalada anteriormente.

Las principales guías de diseño internacionales empleadas como base para el diseño estructural de edificaciones en hormigón prefabricado corresponden a:

- **ACI318 Requisitos de reglamento para concreto estructural**: Es una norma americana, altamente utilizada y relevante con respecto al diseño de estructuras de concreto. Contiene requerimientos para todo tipo de elementos estructurales, desde vigas, losas, columnas, muros, entre otros, los cuales son aplicables a los sistemas y miembros prefabricados (a menos que se excluyan de manera específica). Se referencia directamente con el “Código de Diseño de Hormigón Armado basado en el ACI 318-99”, donde en sus Capítulo 16, 17 y 18 se aborda el diseño de elementos, integridad estructural, diseño de conexiones y apoyo, elementos compuestos de hormigón sometidos a flexión, hormigón pretensado, entre otros.
- **PCI design handbook: Precast and prestressed concrete**: Es un manual de diseño elaborado por el Precast/Prestressed Concrete Institute, donde se presentan metodologías, formulas, ayudas y ejemplos sobre el diseño de elementos de hormigón prefabricado y pretensado. Adicionalmente, se abarca tanto el diseño estructural del elemento como tal, como también diseño de conexiones de todos los tipos, consideraciones de manejo de los elementos durante su transporte e instalación, tolerancias en la fabricación y construcción, consideraciones térmicas, acústicas y resistencia al fuego, entre otros.

# Capítulo 3

## Evaluación de durabilidad y resistencia en edificaciones de mediana altura

En el presente capítulo se desarrolla el diseño de un edificio de estructuración chilena, siguiendo una construcción ya realizada en madera en Chile, con un sistema industrializado de paneles. El capítulo se divide en ocho secciones. En las primeras secciones se describe el edificio en estudio, considerando su geometría, sistema estructural, materialidad, combinaciones y definiciones de cargas. Con esto, las últimas tres secciones, corresponden al análisis estructural, revisión del diseño y verificación de deformaciones del caso estudio.

### 3.1. Caso de estudio

Para el caso de estudio se contempla el proyecto “Horizonte del Pacífico” (HdP), ubicado en la comuna de San Pedro de La Paz, el cual consta de 80 departamentos en cinco edificios de cuatro pisos. Con esto, el edificio contempla las siguientes características:

- Su ubicación se encuentra en la provincia de Concepción en la zona central de Chile (región del Biobío).
- Es un edificio de apartamentos de cuatro pisos, con una altura total de casi 11[m]. La altura de entre piso es de 2.79 [m] para el primer piso, 2.54 [m] para el segundo y tercero, y 2.59[m] para el último piso. Adicionalmente cuenta con cerchas de 0.8[m] de alto.
- Su planta posee dimensiones máximas de 19.26[m] en el sentido longitudinal y 11.74[m] en el sentido transversal, siendo simétrico con respecto a la línea central del eje X de la Figura 3.1.
- Tiene un área por nivel de aproximadamente 202[m<sup>2</sup>] para los primeros tres pisos y un área de 220[m<sup>2</sup>] para el último piso (esta diferencia se debe principalmente a la escalera).

Por una parte, la edificación en madera consiste en paneles industrializados con sistema Wood Frame o marco plataforma. Para el diseño en este material, se utiliza la memoria de cálculo HdP, proporcionado por la empresa E2E (MdC-HdP).

Por otra parte, la edificación en hormigón prefabricado contempla un sistema resistente a fuerzas laterales basado en muros con vigas invertidas en zonas de ventanas. Se utiliza como marco de referencia la tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención ingeniería estructural, sísmica y geotécnica de Luis Gerardo Aguirre Cáliz que lleva por nombre “Lineamientos de diseño para edificios de muros de hormigón prefabricado en Chile” (2021).

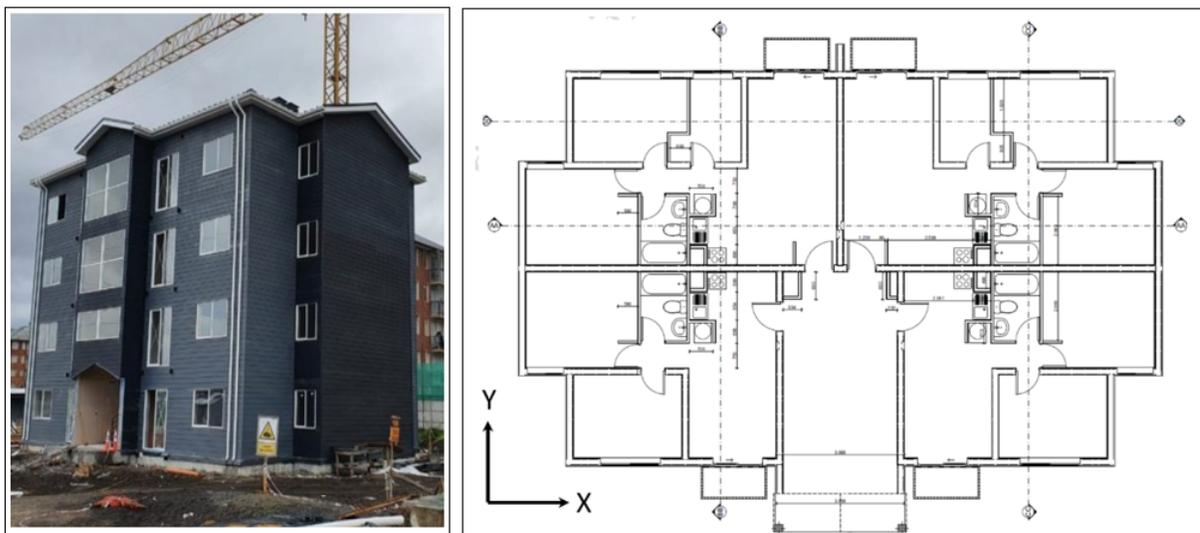


Figura 3.1: Primer edificio del condominio/Fotografía E2E (izquierda) y planta primer piso edificio/MdC-HdP (derecha)

### 3.2. Materiales

Para el diseño del edificio en **madera** se utilizan los elementos especificados en la Tabla 3.1. Adicionalmente se considera hormigón de fundación y radier, aceros de tornillos y herrajes, y el sistema ATS.

Tabla 3.1: Materiales y dimensiones para el diseño en madera.

Elemento	Espesor (mm)	Uso principal	Tipo de madera
Sólido	35	Elemento de muro	Madera aserrada MPG10*
Bilaminado	62	Elemento de muro	MLE grado A-Visual **
HILAM	62/100	Viga perimetral	MLE grado A-Visual **
I-joist LPI 18	-	Viga de piso	Propiedades según LP Corp
LSL	46	Viga perimetral	Propiedades según LP Corp
OSB	11.1	Panel de muro	Clasificación 24/16 de APA
Terciado estructural	18	Panel de piso	Grado F11, norma AS1720.1
* Clasificación según NCh1198			
** Clasificación según NCh2165			

Para el diseño del edificio en **hormigón prefabricado** se utiliza hormigón grado G25, con las propiedades especificadas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Propiedades de los materiales para diseño en hormigón prefabricado.

Hormigón G25 *		Acero A630-420H	
f'c [MPa]	25	fy [MPa]	420
Módulo de Elasticidad** [MPa]	23500	Módulo de Elasticidad** [MPa]	200000
* Resistencia nominal según el Decreto supremo 60 (MINVU 2011)			
** Módulo según ACI 318			

### 3.3. Normas y documentos de referencia

1. ACI (2014) Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario (ACI 318S-14): Versión en español y en sistema métrico SI.
2. ASCE (2016) Minimum Design Load and Asspciated Criteria for Buildings and Other Structures. ASCE/SEI 7-16. American Society of Civil Engineers. Estados Unidos.
3. AWC (2015) Special Design Provisions for Wind Seismic 2015 Edition. SDPWS 2015. American Wood Council. Leesburg, Estados Unidos.
4. AWC (2018) National design specification for wood construction. NDS 2018. American Wood Council. Leesburg. Estados Unidos.
5. INN (1996) Diseño sísmico de edificios. NCh433.Of1996 Modificada en 2012. Instituto de Normalización Nacional. Santiago, Chile.
6. INN (2009) Diseño estructural – Cargas permanentes y cargas de uso. NCh1537.Of2009. Instituto de Normalización Nacional. Santiago, Chile.
7. INN (2017) Diseño estructural – Disposiciones generales y combinaciones de cargas. NCh3171.Of2017. Instituto de Normalización Nacional. Santiago, Chile.
8. INN (1971) Cálculo de la acción del viento sobre las estructuraciones. NCh432.Of71. Instituto de Normalización Nacional. Santiago, Chile.
9. INN (1971) Diseño estructural – Cargas de viento. NCh432-2010. Instituto de Normalización Nacional. Santiago, Chile.
10. INN (2014) Madera – Construcciones en Madera – Cálculo. NCh1198:2014. Instituto de Normalización Nacional. Santiago, Chile.
11. INN (1991) Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata. NCh2165.Of91. Instituto de Normalización Nacional. Santiago, Chile.
12. MINVU (2011) Reglamento que Fija los Requisitos de Diseño y Calculo para el Hormigón Armado: DS 60-2011 (V. y U.)
13. PCI (2004) PCI design handbook: Precast and prestressed concrete, MNL 120-04.

## 3.4. Definición de cargas

### 3.4.1. Estáticas

Las cargas estáticas o gravitacionales utilizadas para el diseño del edificio en estudio consisten en el peso propio (PP) de los elementos estructurales y el 25 % de la sobrecarga de uso o carga viva (SC), establecida en la norma NCh1537 (Of.2009), para edificios de uso habitacional, se consideran los valores de la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Sobre carga SC según NCh1537 Of.2009.

	SC (kg/m <sup>2</sup> )
Losa techumbre ( $L_r$ )	100
Departamentos ( $L$ )	200
Pasillo de uso común	400

En el cálculo del peso propio se considera el tipo de material, para la madera se consideran las densidades de muro y losa entregadas por la MdC-HdP. Para el peso de los elementos de hormigón, se considera la densidad del hormigón armado de 2.50 t/m<sup>3</sup>, y se cubican los muros en base a las características de cada piso, presentadas en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Características de cada piso, según material.

	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4
Alto (m)	2,79	2,74	2,74	2,59
Área Losa (m <sup>2</sup> )	202	202	202	220
	<b>Madera</b>			
Carga Muro (t/m <sup>2</sup> )	0,08	0,07	0,068	0,063
Carga Piso (t/m <sup>2</sup> )	0,197	0,197	0,197	0,089
Espesor Muros(m)	0,164	0,164	0,086	0,086
	<b>Hormigón armado</b>			
Volumen Muros (m <sup>3</sup> )	40,1	39,4	39,4	37,3
Volumen Losa (m <sup>3</sup> )	30,3	30,3	30,3	33,0
Espesor Muros(m)	0,15	0,15	0,15	0,15

Con esto se obtiene el peso sísmico para cada material, presente en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Peso sísmico total, según material.

Piso	Madera				Hormigón armado			
	1	2	3	4	1	2	3	4
SC [t] (25 %)	10,1	10,1	10,1	0	10,1	10,1	10,1	0
PP losa [t]	39,9	39,9	39,9	19,6	75,8	75,8	75,8	82,5
PP muros [t]	16,3	15,0	13,7	6,9	100,3	98,5	98,5	93,1
Peso sísmico [t]	66,3	65,0	63,7	26,5	186,2	184,4	184,4	175,6
Peso Total [t]	<b>221,5</b>				<b>730,6</b>			

### 3.4.2. Sísmicas

La carga sísmica se determina usando lo dispuesto en la norma NCh433 (Of. 2012), considerando que el uso y la ubicación del edificio, se tienen los parámetros de la Tabla 3.6. Adicionalmente se tiene que el factor de modificación de respuesta  $\mathbf{R}$  es igual a 5.5 para la madera, e igual a 4 para el caso de hormigón prefabricado.

Tabla 3.6: Parámetros sísmicos según NCh433 Of.2012.

Categoría	Zona	Suelo	I	Ao/g	S	T0 [s]	T' [s]	n	p
II	3	D	1.0	0,4	1,2	0,75	0,85	1,8	1

El período fundamental aproximado ( $T_a$  [s]) de la estructura en sus dos direcciones principales fue calculado a partir de la Ecuación 3.1 definida por la norma estadounidense ASCE/SEI 7-16:

$$T_a = C_t \cdot h_n^x \quad (3.1)$$

Donde:

$C_t$ : Coeficiente igual a 0,0488 para estructuras de madera (All others structural system) y 0,0466 para estructuras de hormigón.

$h_n$ : Altura de la estructura [m].

$x$ : Coeficiente igual a 0,75 para estructuras de madera (All others structural system) y 0,9 para estructuras de hormigón.

Con esto se tiene el período fundamental aproximado  $T_a$ , el coeficiente sísmico (C) y el corte basal de cada material en la Tabla 3.7. Para ambos materiales prevalece el  $C_{max}=0.192$  y por ende el corte basal máximo  $Q_{max}$ .

Tabla 3.7: Período fundamental aproximado  $T_a$ , coeficiente sísmico (C) y corte basal (Q) de cada material.

	Madera	Hormigón armado
$T_a$ [s]	0,29	0,40
<b>C</b> [-]	1,615	1,263
<b>Cmin</b> [-]	0,08	0,08
<b>Cmax</b> [-]	0,192	0,192
<b>Q=C · I · P</b> [t]	357,6	6922,52
<b>Qmin</b> [t]	17,7	58,5
<b>Qmax</b> [t]	42,5	140,3

Luego, se calcula la distribución de la fuerza sísmica por piso ( $F_k$ ), la cual es idéntica en ambas direcciones, y los momentos ( $M_i$ ) producidos por la excentricidad accidental ( $e_i$ ) según las dimensiones  $b_{iy} = 11742[mm]$  y  $b_{ix} = 19284[mm]$  (idénticas para cada piso). Estos valores son indicados en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Distribución fuerza sísmica por piso, según material.

Madera								
PISO	$P_k(t)$	$Z_k(m)$	$A_k (-)$	$F_k (t)$	Q (t)	$e_i \%$	$M_y (tonf \cdot m)$	$M_x (tonf \cdot m)$
4	26,51	10,86	0,49	11,94	11,94	10 %	14,0	23,0
3	63,71	8,27	0,21	12,47	24,41	8 %	11,2	18,3
2	64,97	5,53	0,16	9,68	34,09	5 %	5,8	9,5
1	66,27	2,79	0,14	8,43	42,52	3 %	2,5	4,2
Hormigón armado								
PISO	$P_k(t)$	$Z_k(m)$	$A_k (-)$	$F_k (t)$	Q (t)	$e_i \%$	$M_y (tonf \cdot m)$	$M_x (tonf \cdot m)$
4	175,63	10,86	0,49	66,71	66,71	10 %	78,3	128,5
3	184,38	8,27	0,21	30,43	97,14	8 %	27,2	44,6
2	184,38	5,53	0,16	23,15	120,29	5 %	13,8	22,7
1	186,18	2,79	0,14	19,98	140,27	3 %	6,0	9,9

La norma ASCE 7 establece que las fuerzas de diseño del diafragma deben ser calculadas según la Ecuación 3.2.

$$F_{pk} = \frac{w_{pk}}{\sum_{i=k}^n w_i} \cdot \sum_{i=k}^n F_i \quad (3.2)$$

Donde:

$F_{pk}$ : Fuerza de diseño del diafragma en el piso k (tonf)

$F_i$ : Fuerza de diseño aplicada en el piso i (tonf)

$w_i$ : Peso sísmico tributario del piso i (tonf)

$w_{pk}$ : Peso sísmico tributario del diafragma en el piso k (tonf)

Con esto, la fuerza de diseño del diafragma ( $F_{pk}$ ), la cual es idéntica para ambas direcciones, es la indicada en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Fuerza de diseño del diafragma, según material.

Madera							
PISO	$F_k(tonf)$	$\sum F_k(tonf)$	$w_i = w_{pk}(tonf)$	$\sum w_i (tonf)$	$F_{pk} (tonf)$	$\sum F_{pk} (tonf)$	$FA = \frac{F_k}{F_i}$
4	11,94	11,94	26,51	26,51	11,94	11,94	1,00
3	12,47	24,41	63,71	90,22	17,24	29,18	1,38
2	9,68	34,09	64,97	155,20	14,27	43,45	1,47
1	8,43	42,52	66,27	221,47	12,72	56,18	1,51
Hormigón armado							
PISO	$F_k(tonf)$	$\sum F_k(tonf)$	$w_i = w_{pk}(tonf)$	$\sum w_i(tonf)$	$F_{pk}(tonf)$	$\sum F_{pk}(tonf)$	$FA = \frac{F_k}{F_i}$
4	66,71	66,71	175,63	175,63	66,71	66,71	1,00
3	30,43	97,14	184,38	360,01	49,75	116,46	1,63
2	23,15	120,29	184,38	544,39	40,74	157,20	1,76
1	19,98	140,27	186,18	730,57	35,75	192,94	1,79

### 3.4.3. Viento

El análisis de la estructura por carga de viento se realiza según lo ya estipulado en la MdC-HdP, aplicando las últimas dos normas NCh432:

- NCh432 Of.1971: se considera la condición de “construcciones situadas en campo abierto, ante el mar, o en sitios asimilables”.
- NCh432 Of.2010: se considera el procedimiento simplificado y los parámetros indicadas en la Tabla 3.10.

En la Figura 4.3 se presenta una comparación entre fuerzas sísmicas y de viento para la madera (Fuente: MdC-HdP), donde se concluye que el efecto del viento en el corte por piso es menor respecto al efecto del sísmico. Adicionalmente se puede concluir que el efecto del viento según la norma NCh432 Of.1971 es menor al efecto de la NCh432 Of.2010, por lo que se utilizará esta última en el análisis estructural del edificio en hormigón prefabricado.

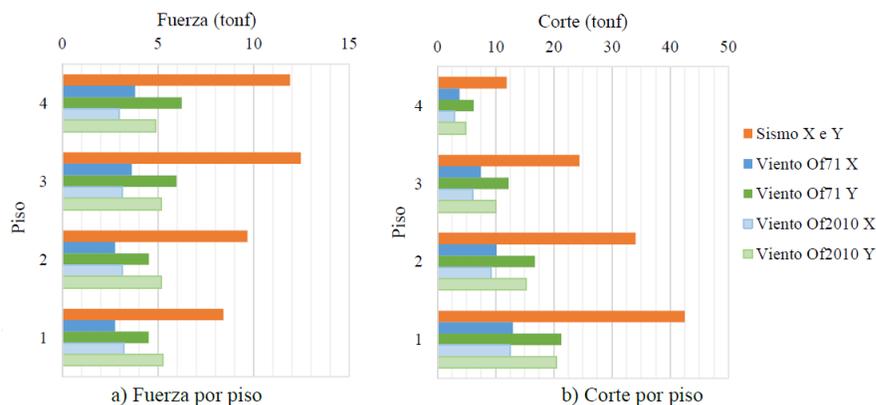


Figura 3.2: Comparación entre fuerzas sísmicas y de viento para la madera (MdC-HdP).

Tabla 3.10: Parámetros, fuerza y corte por piso, considerados según la norma NCh432.Of2010.

ps30 (kN/m2)	$\lambda$	Kzt	I	ps (kN/m2)
0,48	1,74	1	1,15	0,96
	<b>Fuerza por piso (tonf)</b>		<b>Corte por piso (tonf)</b>	
<b>Piso</b>	<b>Wx</b>	<b>Wy</b>	<b>Qx</b>	<b>Qy</b>
<b>4</b>	2,92	4,79	2,92	4,79
<b>3</b>	3,09	5,07	6,01	9,86
<b>2</b>	3,09	5,07	9,10	14,93
<b>1</b>	3,15	5,16	12,25	20,09

### 3.5. Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga utilizadas (Tabla 3.11) corresponden a las estipuladas en la NCh3171, donde se utiliza:

- Método de diseño por tensiones admisibles (ASD) para el caso de la madera.
- Método de factores de carga y resistencia (LRFD) para los elementos de hormigón armado, según lo dispuesto en el ACI 318-14 (ACI 2014).

Para ambos diseños se desprecian las combinaciones de carga que incluyan nieve y lluvia, en vista que se considera que la mayor amenaza a la que se verá sometida la estructura en su vida útil serán los sismos y el viento.

Tabla 3.11: Combinaciones de carga según método a utilizar.

Método ASD para madera		Método LRFD para hormigón armado		Donde: D: Carga permanente L: Carga de uso Lr: Carga de uso de techo Ei: Carga sísmica en dirección i Wi: Carga de viento en dirección i
Nº	Combinación	Nº	Combinación	
1	D	1	1.4D	
2	D+L	2	1.2D+1.6L	
3	D+Lr	3a	1.2D+1L+-1.4Ex	
4a	D+- Ex	3b	1.2D+1L+-1.4Ey	
4b	D+- Ey	4a	1.2D+1L+-1.6Wx	
5a	D+0.75L+-Ex	4b	1.2D+1L+-1.6Wy	
5b	D+0.75L+-Ey	5a	0.9D+-1.4Ex	
6a	D+- Wx	5b	0.9D+-1.4Ey	
6b	D+- Wy	6a	0.9D+-1.4Wx	
7a	D+0.75L+0.75Lr+-0.75Wx	6b	0.9D+-1.4Wy	
7b	D+0.75L+0.75Lr+-0.75Wy			

## 3.6. Diseño de la estructura

Con base en las cargas de diseño y las combinaciones definidas, se procede a determinar la resistencia de los elementos estructurales, tanto en madera como en hormigón. Para ambos casos la nomenclatura de muros es la presentada en la Figura 3.3 (izquierda) y el modelo BIM realizado por E2E (derecha).

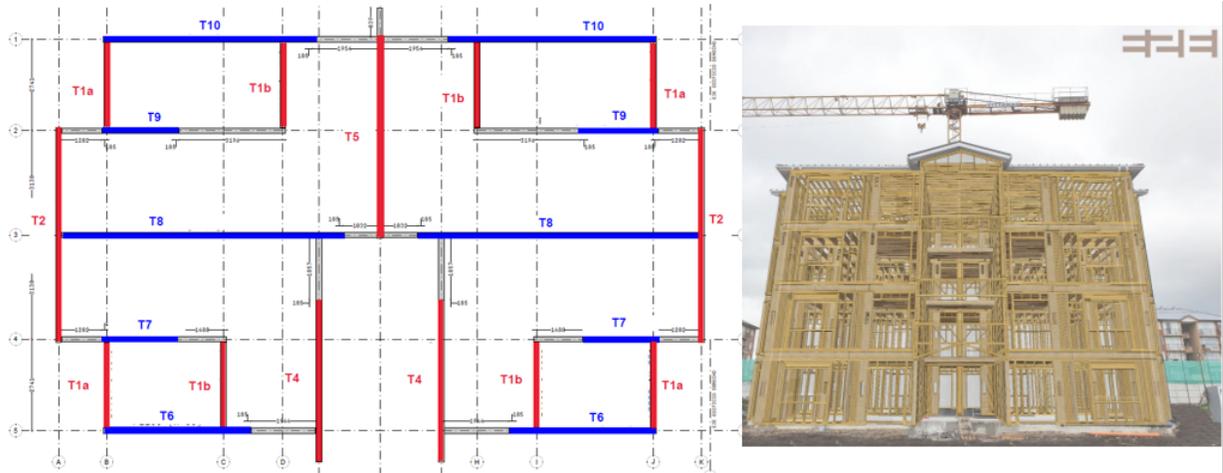


Figura 3.3: Nomenclatura de muros (izquierda) y modelo BIM realizado por E2E (derecha).

Cabe destacar que, para el caso particular de la estructura de hormigón prefabricado, las densidades de muro ( $\rho$ ) corresponden a:  $\rho_x$  igual a 3.21 % y  $\rho_y$  igual a 3.33 % para las direcciones x e y, respectivamente.

### 3.6.1. Madera

La presente sección tiene por objeto el análisis estructural de los elementos de diseño. Ver Anexo A para mayores detalles y recursos adicionales del cálculo de madera.

#### Análisis sísmico

Según lo estipulado en la norma NCh433, el desplazamiento relativo máximo entre dos pisos consecutivos, medido en el centro de masas en cada una de las direcciones de análisis, no debe ser mayor que la altura de entrepiso multiplicada por 0,002. Lo que es equivalente a la ecuación 3.3.

$$\text{Drift} = \frac{\text{Desplazamiento máximo entrepisos}}{\text{Altura total edificio}} \leq 2\text{‰} \quad (3.3)$$

Para el análisis sísmico se consideran los dos modelos de diafragma: flexible y rígido. Para esto se utiliza como referencia la norma estadounidense SDPWS ya que actualmente no existe normativa nacional que permita estimar el desplazamiento máximo entrepisos en sistemas compuestos por muros de madera.

Es por esto que se considera la ecuación 3.4 para el cálculo del **modelo flexible**, la cual consta de tres términos: flexión del panel ( $\delta_f$ ), corte del panel y los clavos ( $\delta_c$ ) y elongación del sistema de anclaje ( $\delta_e$ ).

$$\delta = \delta_f + \delta_c + \delta_e = \frac{8 \cdot v \cdot h^3}{E \cdot A \cdot b} + \frac{v \cdot h}{1000 \cdot G_a} + \frac{h \cdot \Delta_a}{b} \quad (3.4)$$

El drift de entrepiso para cada muro obtenido del modelo flexible es indicado en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12: Modelo flexible – Drift de entrepiso (%). (MdC-HdP).

Piso	T1a	T1b	T2	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
4	5,1	8,1	1,7	3,3	2,8	6,4	6,5	1,7	5,1	3,6
3	4,2	6,8	1,4	2,8	2,4	5,1	5,3	1,8	4,2	3
2	3	4,9	1,1	2,4	2,1	3,5	3,8	1,6	3,3	2,3
1	1,3	2	0,9	1,4	1,3	1,8	2,2	1,3	2	1,5

Por otra parte, para el cálculo del **modelo rígido** el desplazamiento de la estructura se obtiene concentrando la rigidez del muro en su centro de rigidez. Con esto el drift de entrepiso en el centro de masa (CM) y en otro punto, para cada piso, es indicado en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13: Modelo rígido – Drift de entrepiso (%). (MdC-HdP).

Piso	En CM (límite 2 %.)		En otro punto (límite 1 %.)	
	X	Y	X	Y
4	2,34	2,42	0,39	0,91
3	2,36	2,03	0,27	0,67
2	1,88	1,63	0,19	0,47
1	1,37	0,93	0,1	0,28

### Elementos de diseño: muros

Para el diseño de muro se tienen las siguientes consideraciones:

- Todos los muros tienen una altura de 2448 [mm].
- El largo considerado como muro sismorresistente se indica en la Tabla 3.14.
- En particular para muros perforados, el largo sin ventanas es de 2534 [mm] para el muro T6 y 3675 [mm] para el muro T10.
- Los muros están compuestos por: solera superior, solera inferior, pie derecho interior, pie derecho de borde, sistema ATS y placa OSB.
- Existen 3 patrones de clavado: P1 para 6d@100mm, P2 para 6d@50mm y P3 para 8d@50mm.

- En la Tabla 3.14 también se señalan: el patrón de clavado de bordes en muros (PC), los pies derechos de borde en muros (PDB) con notación  $N^\circ$  de bilaminados +  $N^\circ$  de sólidos, el diámetro de la barra ATS ( $\phi$  ATS) y la cantidad de vigas de entrepiso ( $\#VE$ ). Estas propiedades corresponden al piso basal 1.

Tabla 3.14: Propiedades de muros. (MdC-HdP).

Eje	Tipo de muro	Muro	Largo [mm]	PC	PDB	$\phi$ ATS [pulgadas]	#VE	
Y	Segmentados	T1a	2550	P3	4+4	1 1/4	2**	
		T1b	2550				2	
		T2	6446		4+8	1 1/4*	2**	
		T4	4864			1 1/4		
		T5	5793			1 1/4		
T8		8362	1 1/4*	2				
X		Segmentados	T9	2231	P2	4+8	7/8*	2
			T7	2261				
		Perforados	T10	6245	P3	4+8	1 1/4*	2**
			T6	4419			1 1/4	
* Barras High-Strength								
** Corresponde a: una viga HILAM de 62 mm de ancho y una viga suplemento de HILAM de 65 mm de ancho								

Una vez definidas las características de los muros se comprueban los **pies derechos interiores (PDI)**, para esto se considera que estuvieron sometidos a cargas de compresión y flexo-compresión, y el elemento que controló el diseño fue el PDI del muro T10 en el piso 3 controlado por la combinación 6b ( $D \pm W_y$ ). La carga de viento fue aplicada según la norma del año 1971 por ser más desfavorable. Con esto se tienen los cálculos de la Tabla 3.15, donde se señala que la interacción de flexo-compresión ( $(f_{cp}/F_{cp}^{dis})^2$ ) es 0.49 por ende  $<1$ .

Tabla 3.15: Verificación de los PDI.

Largo trib [mm]	$f_f$ [Mpa]	$f_{cp}$ [Mpa]	$F_f^{dis}$ [Mpa]	$F_{cp}^{dis}$ [Mpa]	$(f_{cp}/F_{cp}^{dis})^2$ [-]
1370	4,6	0,74	13,66	3,16	<b>0,49</b>

Luego se procede a verificar los siguientes aspectos:

- **Corte en el plano:** la capacidad al corte viene dada por el patrón de clavado como se presenta en la Tabla 3.16 (calculada según SDPWS 2015). La demanda se consideró a partir de la envolvente entre un modelo con diafragma rígido y otro flexible.

Tabla 3.16: Capacidad a corte según patrón de clavado.

Configuración	Patrón	Capacidad (kgf/m)
P1	6d@100	848
P2	6d@50	1442
P3	8d@50	1810

- **Flexo-compresión del muro:** las capacidades de las barras ATS sometidas a tracción son indicadas en la Tabla 3.17. La demanda sobre las barras ATS se consideró según la componente sísmica para la tracción y la estática para la compresión.

Tabla 3.17: Capacidad a tracción de barras ATS.

D	$A_g$	$A_e$	$F_y$	$F_u$	$P_n/\Omega$	
in	in <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>	ksi	ksi	kips	kgf
½	0,196	0,142	36	58	4,12	1867
¾	0,601	0,462	36	58	12,96	5880
¾*	0,601	0,462	92	120	27,7	12566
1*	0,785	0,606	92	120	36,34	16486
1 ¼	1,227	0,969	36	58	26,45	11999
1 ¼*	1,227	0,969	105	125	60,57	27474

- **Compresión PDB:** las capacidades de los PDB a compresión son indicadas en la Tabla 3.18. La demanda del primer piso estuvo controlada por la compresión paralela a la fibra del PDB, mientras que en los pisos superiores el sistema estuvo controlado por la compresión normal de la viga de entrepiso. El piso 2 presentó los casos más desfavorables por lo que se muestra en la Tabla 3.19.

Tabla 3.18: Capacidad a compresión PDB.

$F_{cp}^{dis}$ [Mpa]	$F_{cn}^{dis}$ [Mpa]
3,16	<b>2</b>

En la Tabla 3.19 se presenta la demanda considerada para cada uno de los casos señalados previamente y el factor de utilización (FU) obtenido.

Tabla 3.19: Verificación de muros.

Muros	Corte PISO 1		Flexo-compresión PISO 1		Compresión PDB PISO 2	
	Demanda Corte (kgf/m)	FU	Demanda Tracción (kgf/m)	FU	Demanda Compresión (MPa)	FU
T1a	929	0,51	7075	0,59	1,16	0,58
T1b	1357	0,75	10885	<b>0,91</b>	2,01	<b>1,01</b>
T2	1324	0,73	10906	0,4	1,52	0,76
T4	1357	0,75	9932	0,83	1,8	0,9
T5	1357	0,75	9779	0,81	2,03	<b>1,01</b>
T6	1399	0,77	9870	0,82	1,21	0,6
T7	786	0,55	6818	0,54	1,19	0,59
T8	1718	<b>0,95</b>	12734	0,46	2,1	<b>1,05</b>
T9	198	0,14	6204	0,49	1,11	0,55
T10	1507	0,83	8793	0,73	1,17	0,58

## Verificación del Diafragma

Cada diafragma de piso está conformado por un conjunto de casetones que a su vez están conformado por un conjunto de paneles de madera. En la Figura 3.4 se muestra la nomenclatura de los casetones y la distribución de paneles, bloqueos y vigas cielo 1 (diafragma horizontal ubicado entre los pisos 1 y 2), en esta imagen, debido a la distribución simétrica de los casetones respecto al eje F, se presenta a la izquierda la distribución de paneles y a la derecha la distribución de bloqueos y vigas.

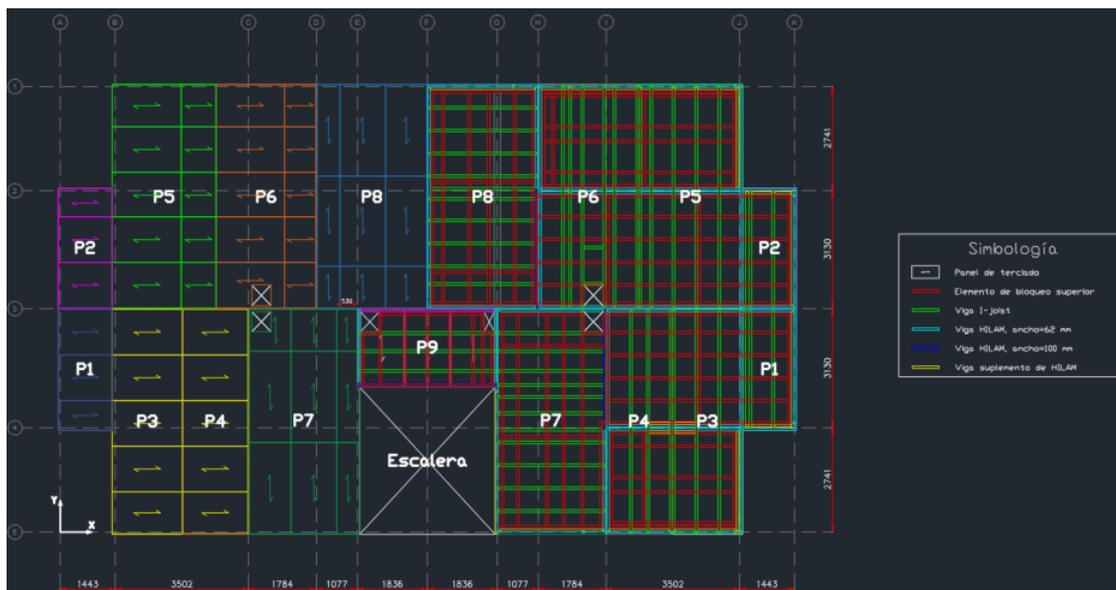


Figura 3.4: Casetones y distribución de paneles, bloqueos y vigas cielo 1 (MdC-HdP).

Para la verificación se consideran los siguientes aspectos:

- **Flexión fuera del plano:** para esto se detalla la verificación de la viga HILAM y el panel terciado. El factor de utilización (FU) para ambos elementos se presenta en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20: Factor de utilización de la viga HILAM y el panel terciado. (MdC-HdP).

	Viga HILAM					Panel terciado	
	Momento	Corte	Aplastamiento	Deflexión	Vibración	Momento	Corte
FU [-]	0,77	0,86	0,98	0,53	0,83	0,42	0,08

- **Corte en el plano:** se considera un patrón de clavado 6d@50mm, el cual tiene una capacidad de 594 kgf/m (calculada según SDPWS 2015). La demanda de corte y el factor de utilización (FU) se presenta en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21: Verificación corte en el plano en dirección x e y. (MdC-HdP).

Piso	Demanda de corte por unidad de longitud [kgf/m]		FU [-]	
	x	y	x	y
4	309	254	0,52	0,43
3	447	367	<b>0,75</b>	0,62
2	370	304	0,62	0,51
1	330	271	0,56	0,46

- **Flexión en el plano:** se considera que la tensión de diseño de las cuerdas estuvo controlada por la tracción paralela de la fibra, la cual equivale a 9,07 MPa. La demanda de tensión sobre las cuerdas y el factor de utilización (FU) se presenta en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22: Verificación flexión en el plano en dirección x e y. (MdC-HdP).

Piso	Tensión de trabajo sobre las cuerdas [MPa]		FU [-]	
	x	y	x	y
4	1,68	1,38	<b>0,19</b>	0,15
1, 2 y 3	1,14	0,94	0,13	0,1

- **Colectores:** son elementos del diafragma horizontal paralelos a la acción de la carga que transfieren la carga desde el diafragma hacia los muros o distribuyen las fuerzas dentro del diafragma. Debido a la bidireccionalidad de la fuerza sísmica, los colectores son diseñados para tomar fuerzas de tracción y compresión. Se considera que el colector que controla el diseño está ubicado en el cielo 2 entre el par de muros T9. La tensión de diseño, la demanda de tensión y el factor de utilización (FU) se presenta en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23: Verificación de colectores. (MdC-HdP).

Tensión de demanda [MPa]	Tensión de capacidad [MPa]	FU [-]
2,87	6,04	0,47

## Conectores cilíndricos y su capacidad de cizalle

Los medios de unión empleados en el proyecto que conectan al menos un elemento de madera corresponden a: clavos, tornillos, tirafondos, pernos y pasadores. En la Tabla 3.24 se presenta la máxima capacidad admisible de extracción lateral de los medios de unión en forma cilíndrica trabajando a cizalle simple entre dos piezas de madera de la especie maderera pino radiata con densidad anhidra de 450 kg/m<sup>3</sup>.

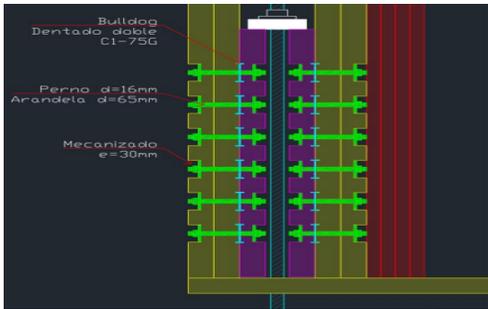
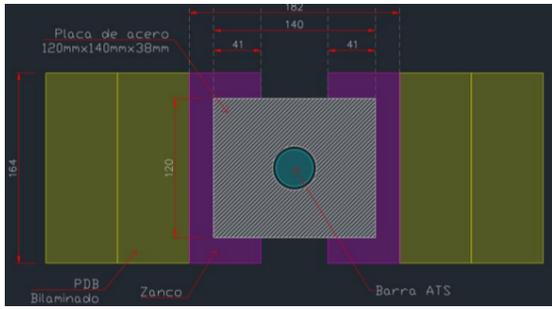
Tabla 3.24: Conectores - Máxima capacidad admisible de extracción lateral. (MdC-HdP).

Término	Unidad	Clavo			Perno		
		6d	8d	10d	12mm	16mm	Titen HD ½"
D	mm	2,5	3,1	3,8	12	16	12,7
$F_f$	MPa	751	716	678	310	310	310
$I_c$ y $I_l$	mm	20	23	27	57	75	60
$R_c^{ap}$ y $R_l^{ap}$	MPa	26,5			34,7		
$P_{el}^{adm}$	kgf	24	35	51	275	489	308
Término	Unidad	Tornillo				Pasador	Tirafondo
		HSI 6x120	SDS ¼"	SD #9	LBS 5x70	WS7x153	ESCRFTZ8
D	mm	4,00	4,70	2,77	3,00	7	5,2
$F_f$	MPa	664	1131	1296	722	410	5594
$I_c$ y $I_l$	mm	29	43	28	22	38	35
$R_c^{ap}$ y $R_l^{ap}$	MPa	26,5				34,7	26,5
$P_{el}^{adm}$	kgf	57	96	38	33	172	78

## Conexiones PDB-ATS

La conexión PDB-ATS cumple el rol de traspasar la fuerza de tracción desde los PDB del muro a la barra ATS. Esta conexión cuenta con dos zonas conectadas: conector dentado Bulldog más perno y placa de acero, como se muestra en la Tabla 3.25

Tabla 3.25: Conexiones PDB-ATS (MdC-HdP).

	Conector dentado más perno		Placa de acero	
	(a) Conexión PDB-zanco		(b) Placa de acero (planta).	
				
	Piso 1 y 2	Piso 3 y 4	Piso 1 y 2	Piso 3 y 4
<b>Demanda (D) [kgf]</b>	11165	7108	<b>Demanda (D) [MPa]</b>	11,13
<b>Capacidad (C) [kgf]</b>	7328	7440	<b>Capacidad (C) [MPa]</b>	11,65
<b>FU (D/C) [-]</b>	1,52	0,95	<b>F.U (D/C) [-]</b>	0,96

## Conexiones de entrepiso

En la Tabla 3.26 se presenta una breve descripción de los tipos de conexiones empleados en entrepisos, con su respectivo factor de utilización.

Tabla 3.26: Conexiones de entrepiso.

Conexiones de corte		Conexiones de tracción
Muro interior	Muro perimetral	Muros perforados
<p>Ángulo: une la solera inferior con la viga de casetón.  Clavo: une la viga del casetón con la solera del casetón.  Tirafondo inclinado: une la solera del casetón con la solera superior del muro inferior.</p>	<p>Clavo: une la solera del muro con el panel de OSB perimetral.  Ángulo: une la solera con la viga.  Clavo: une la viga del casetón con la solera del casetón  Tirafondo inclinado: une la solera del casetón con la solera superior del muro.</p>	<p>Anclaje de la solera inferior del muro por medio de placas CS22 unidas a los PDI con 8 clavos 10d por lado.</p>
<b>Elemento que controla el diseño</b>		
Muro T1b y T5 con cielo 1	Muro T2 del cielo 2	Muro T10 en cielo 1
<b>Demanda (D) [kgf/m]</b>		
1494	1242	1113
<b>Capacidad (C) [kgf/m]</b>		
1493	1250	1202
<b>Factor de utilización (D/C) [-]</b>		
1,00	0,99	0,93

A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 3.5 los elementos de conexión de entrepiso muro perimetral cielo 1, 2 y 3.

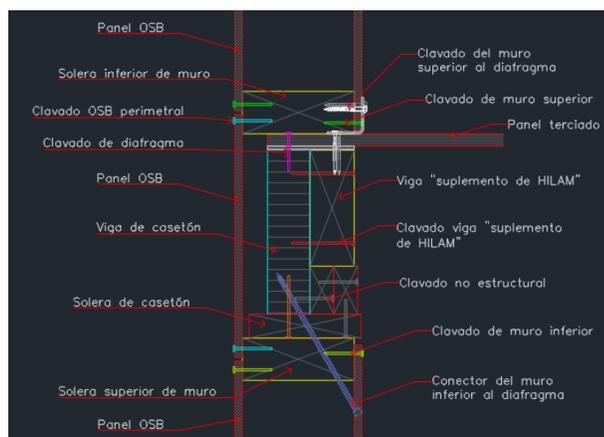


Figura 3.5: Elementos de conexión de entrepiso muro perimetral cielo 1, 2 y 3. (MdC-HdP).

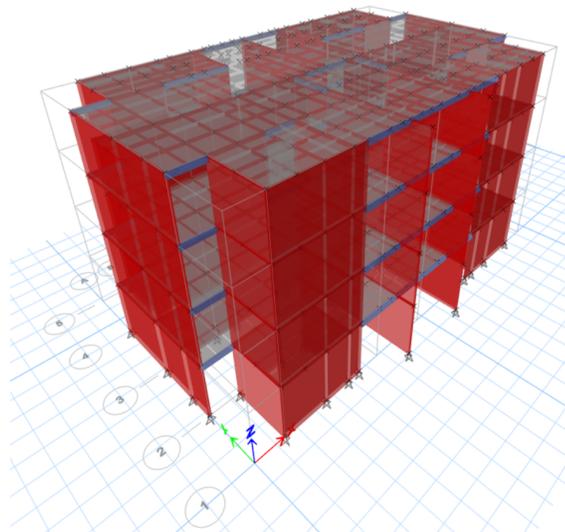
### 3.6.2. Hormigón prefabricado

#### Modelo estructural

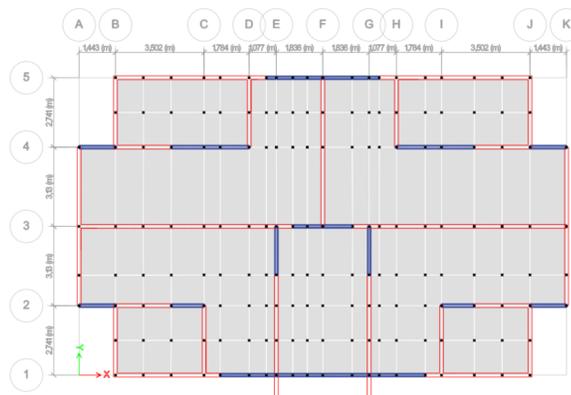
Para el análisis estructural se utiliza el software de análisis y diseño, ETABS v.19.0.0. Se define un modelo tridimensional como se observa en la Figura 3.6.a, y se realiza un análisis lineal – elástico.

Se emplean 3 tipos de elementos (como se puede observar por color en la Figura 3.6.b): *Shell* para modelar los muros, *Slabs* para losas y *Frame* para vigas. Además, se les asigna un diafragma rígido a todas las losas en todos los niveles, para que estas funcionen solamente como distribuidoras de las cargas gravitacionales a las vigas y muros y así despreocupar las deformaciones en el plano.

El modelo considera las cargas gravitacionales de peso propio (calculado automáticamente por el programa), carga muerta (0.1[tonf/m<sup>2</sup>] al ser departamentos) y carga viva (sobrecarga) según el uso de la Tabla 3.3, las que son distribuidas de forma uniforme en las losas. Adicionalmente, se considera la carga sísmica a través de un análisis modal espectral, según lo indicado en la norma NCh433.



(a) Modelo tridimensional.



(b) Planta tipo.

Figura 3.6: Modelo estructural realizado en ETABS.

Fuente: Elaboración propia.

## Análisis modal espectral

A partir del modelo descrito previamente, se obtienen los periodos de la estructura, presentes en la Tabla 3.27. Se incluyen los primeros 13 modos ya que según lo estipulado por la NCh433: se debe incluir en el análisis todos los modos normales ordenados según valores crecientes de las frecuencias propias, que sean necesarios para que la suma de las masas equivalentes para cada una de las dos acciones sísmicas sea mayor o igual a un 90 % de la masa total. Con esto, se puede observar que: en el modo de vibrar 1 (en color azul) predomina el desplazamiento en Y (dirección corta), en el modo de vibrar 2 (en color rojo) predomina el desplazamiento en X (dirección larga) y el modo de vibrar 3 (en color naranja) es rotacional y traslacional, sin embargo, predomina la torsión (giro en torno al eje Z) por sobre los desplazamientos.

Tabla 3.27: Periodos y participación de masa modal según Modelo ETABS.

Modo	Periodo [seg]	UX [-]	UY [-]	SumUX [-]	SumUY [-]	RX [-]	RY [-]	RZ [-]
1	0,092	8,395E-07	0,746	8,395E-07	0,746	0,3975	5,628E-07	0,000001306
2	0,076	0,5598	0	0,5598	0,746	0	0,2436	0,2228
3	0,065	0,233	0,000002158	0,7927	0,746	0,00000105	0,0972	0,5542
4	0,043	0,0031	0	0,7958	0,746	0	0,0175	0,0027
5	0,043	0,0028	6,011E-07	0,7987	0,746	0	0,0153	0,0025
6	0,042	0,00001148	0,000004385	0,7987	0,746	0	0,0001	0,00002917
7	0,041	0,0007	0	0,7994	0,746	0	0,0013	0,0013
8	0,04	0,0001	0,000001109	0,7995	0,746	0	0,00000103	0,0002
9	0,039	0,001	0	0,8005	0,746	0	9,651E-07	0,0013
10	0,035	0,0001	0	0,8006	0,746	0,000000599	0,0001	0,0001
11	0,035	0,0019	0	0,8025	0,746	0	0,0021	0,0023
12	0,024	0,000008041	0,2037	0,8025	0,9497	0,4536	0,00002474	0
13	0,022	0,1401	0,00000754	0,9426	0,9497	0,00001486	0,443	0,015

Se tiene que el peso sísmico (PS) del edificio es de 721.39 [Tonf] y con un área total de 880 [m<sup>2</sup>], se obtiene una densidad sísmica de 0.82 [Tonf/m<sup>2</sup>], lo que se encuentra en el rango esperable para un edificio con muros de hormigón armado. Luego, dado que el corte elástico ( $Q_e$ ) es mayor al corte mínimo, se sigue la formulación dispuesta en la NCh433 y se calcula el factor de reducción ( $R^*$ ) correspondiente, como se observa en la Tabla 3.28.

Tabla 3.28: Corte elástico reducido y coeficiente de reducción.

Dirección	Periodo (seg)	PS (tonf)	% MM	$R^*$	$Q_e$ (tonf)	% PS	$Q_e/R^*$ (tonf)	% Peso
X	0,076	721,39	74,6 %	2,00	313.70	43 %	156,85	21,74 %
Y	0,092	721,39	55,98 %	2,00	380.80	53 %	190,40	26,39 %

En la Figura 3.7 se presenta el espectro elástico en conjunto con los espectros inelásticos en las direcciones X e Y.

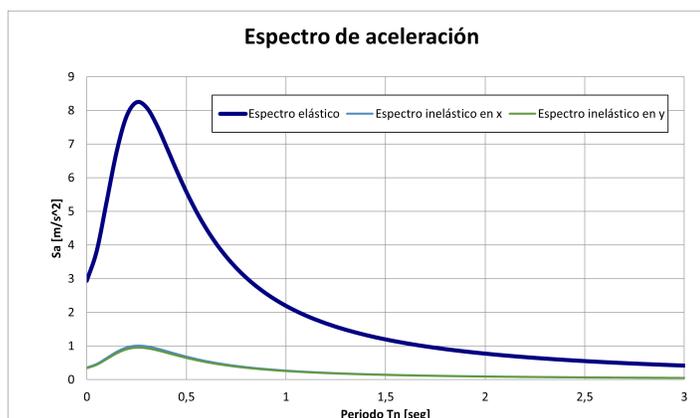


Figura 3.7: Espectros de diseño elástico y reducidos.  
Fuente: Elaboración propia.

Con los valores del espectro modificado se realiza el análisis por torsión accidental, con lo que siguiendo la NCh433 se obtienen las excentricidades de la Tabla 3.29.

Tabla 3.29: Excentricidad por análisis de torsión accidental.

Piso	h(m)	z(m)	bky(m)	bkx(m)	ex. X(m)	ex. Y(m)
4	2,59	10,86	11,742	19,284	1,17	1,93
3	2,74	8,27	11,742	19,284	0,89	1,47
2	2,74	5,53	11,742	19,284	0,60	0,98
1	2,79	2,79	11,742	19,284	0,30	0,50

Luego se procede a realizar el análisis de desplazamiento entre pisos para cada una de las direcciones, tanto en el centro de masa (ver Tabla 3.30) como en un punto extremo considerado como la intersección del eje J con el eje 1 (ver Tabla 3.31). Se observa que ambos puntos están por debajo de los límites normativos.

Tabla 3.30: Desplazamientos normativos en entrepiso en el centro de masa.

Piso	Desplazamiento		Desplazamiento entre piso		Límite normativo	Altura piso
	UX (cm)	UY (cm)	x (cm)	y (cm)	0.002H (cm)	H (m)
4	0,1073	0,2165	0,026	0,0619	0,518	2,59
3	0,0813	0,1546	0,0308	0,0663	0,548	2,74
2	0,0505	0,0883	0,0297	0,0562	0,548	2,74
1	0,0208	0,0321	0,0208	0,0321	0,558	2,79

Tabla 3.31: Desplazamientos normativos en entrepiso en un punto extremo.

Piso	Desplazamiento		Desplazamiento entre piso		Límite	
	UX (cm)	UY (cm)	x (cm)	y (cm)	X (cm)	Y (cm)
4	0,1578	0,2489	0,0391	0,0707	0,285	0,3209
3	0,1187	0,1782	0,046	0,0759	0,3048	0,3403
2	0,0727	0,1023	0,0434	0,0648	0,3037	0,3302
1	0,0293	0,0375	0,0293	0,0375	0,2998	0,3111

### Elementos de diseño: muros

Para el diseño de **muros** se considera que, según lo establecido en el DS 60-2011: Se permite el uso de muros estructurales ordinarios en estructuras de hasta 5 pisos que hayan sido diseñadas utilizando de un factor de modificación de la respuesta, R, igual o menor a 4, de acuerdo a la Tabla 5.1 de NCh433. Es por esto que, efectivamente se pueden considerar muros ordinarios. Con esto, el diseño de muros debe considerar los requerimientos normativos siguientes:

- Según lo especificado en el código ACI 318: se verifica la resistencia a flexión y carga axial del elemento para todas las combinaciones de carga y en las direcciones principales del muro. Además, se verifica la resistencia al corte.
- Según el DS 60-2011: verificar el límite de carga axial, cuantía y separación máximas.

Se realizan estas verificaciones para todos los muros. En particular, en la Tabla 3.32 se muestra el cumplimiento del muro T8 a nivel basal, ya que corresponde al de mayor demanda según lo obtenido por el modelo. En la Figura 3.8 se muestra el bosquejo del muro y la orientación del eje principal de diseño, con la armadura propuesta. Adicionalmente, en el diagrama de interacción de la Figura 3.9 se puede notar que el muro posee una resistencia superior a la solicitación por todas las combinaciones de carga, obteniéndose un factor de utilización (D/C) del 72 % para el momento, de 15 % para la carga axial y de 19 % para corte.

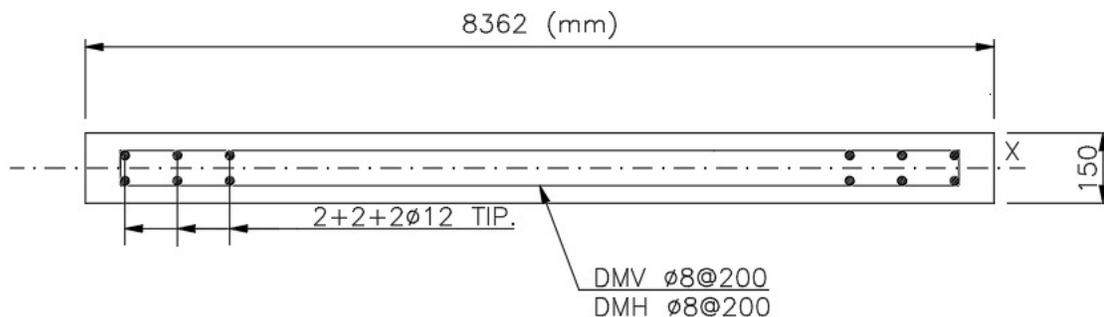


Figura 3.8: Diseño de muro T8.  
Fuente: Elaboración propia.

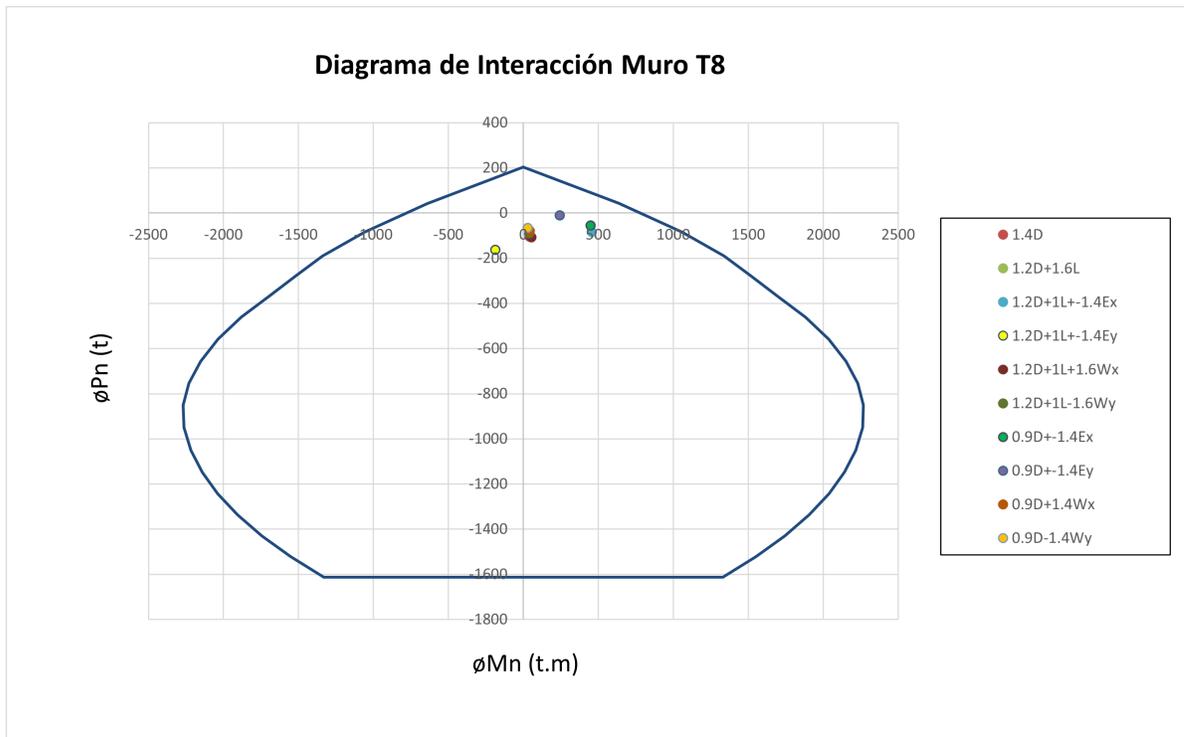


Figura 3.9: Diagrama de interacción muro T8. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.32: Verificación de los requerimientos normativos en muro T8.  
Fuente: Elaboración propia.

Requerimiento a compresión (DS60)			
<b>Pu [tonf]</b>	$\leq$	$0,35 \cdot f'c \cdot A_g$ [tonf]	<b>¿Cumple?</b>
-163,4		1119,2	Si
Requerimiento a corte (ACI318-08)			
Corte nominal			
<b>Vu [tonf]</b>	$\leq$	$\phi V_n = 0,6 \cdot (0,66 \cdot A_{cv} \cdot \sqrt{f'c})$ [tonf]	<b>¿Cumple?</b>
48,57		253,248	Si
Cuantía de refuerzo y espaciamiento			
Considera doble capa (DS60)			Si
$\rho_t$ (transversal)	$\geq$	0,0025	Si
0,0034			
$\rho_l$ (longitudinal)	$\geq$	0,0025	Si
0,0034			
Smax. en malla [mm]	$\leq$	400	Si
200			
Factor de utilización (demanda/capacidad)			
Corte (V2)		19 %	
Momento (M3)		72 %	
Carga Axial (P)		15 %	

## Elementos de diseño: vigas

Para verificar el diseño de vigas se debe considerar lo indicado en el código ACI 318 que corresponde a la revisión del diseño a flexión (momento nominal y cumplimiento de cuantía mínima y máxima) y la revisión del diseño a corte (resistencia al corte, separación y área de estribos y corte nominal máximo aportado por el acero). Dado que se espera que la eventual disipación de energía durante un sismo ocurra en la base de los muros y no en las vigas, estas no requieren detallamiento especial para el desarrollo de rotulas plásticas.

Todas las vigas son V15x40 y cumplen, en particular se muestra el diseño de la viga ubicada en el eje 2 hasta el eje B (del piso 3), ya que corresponde al elemento de mayor demanda y controla el diseño. En la Figura 3.10 se muestra un esquema de la armadura propuesta y en la Tabla 3.33 se resume el diseño de la viga. Los valores de carga axial, fuerza cortante y de momento flector, fueron tomados del modelo a partir de la comparación de las solicitaciones, donde la combinación 3b (1.2D+L+1.4Ey) presentó el caso más desfavorable. Como se puede observar en la Tabla 3.33, la viga posee un nivel de utilización (D/C) de 35 % para el momento y de 39 % para el cortante.

Por otra parte, no se considerará que las vigas son invertidas ya que serán usadas como elementos de apoyo por las unidades de piso, por lo que serán normales y el nivel inferior de las vigas coincidirá con el nivel de las losas.

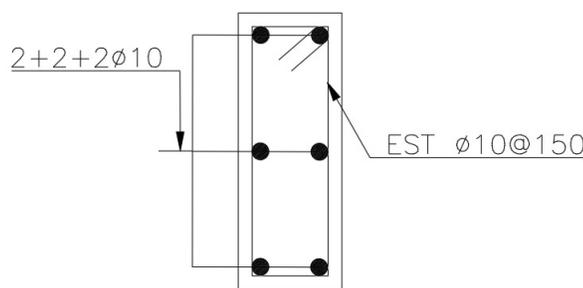


Figura 3.10: Vista transversal viga más desfavorable.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.33: Verificación de los requerimientos normativos en viga.  
Fuente: Elaboración propia.

Requerimiento a flexión				Requerimiento a corte			
Momento nominal				Corte nominal			
Mu [tonf · m]	≤	$\phi \cdot Mn$ [tonf · m]	¿Cumple?	Vu [tonf]	≤	$\phi Vn$ [tonf]	¿Cumple?
2,5		6,2	Si	3,00		4,58	Si
Cuantía mínima y máxima				Corte máximo			
$\frac{1.4}{fy}$	$\leq \rho \leq$	0,025		Vs [tonf]	≤	$0,66 \cdot bw \cdot d \cdot \sqrt{f'c}$ [tonf]	¿Cumple?
0,0033	0,01	0,025	Si	0,51		1,83	Si
Acero mínimo de estribos [mm2]				Separación de estribos [mm]			
As	≥	$0.062 \frac{\sqrt{f'c} \cdot b \cdot s}{fy} = 22,14$	Si	S	≤	min(d/4;300)	
157		$0.35 \frac{b \cdot s}{fy} = 25$	Si	150		300	Si
Factor de utilización (demanda/capacidad)				Factor de utilización (demanda/capacidad)			
Corte (V2)		66 %		Momento (M3)		40 %	

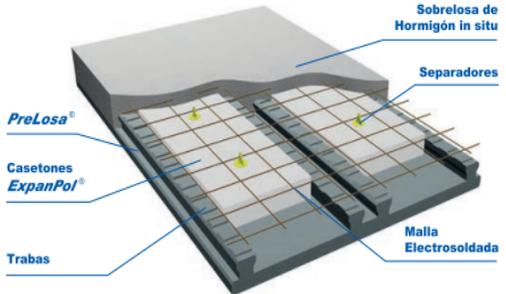
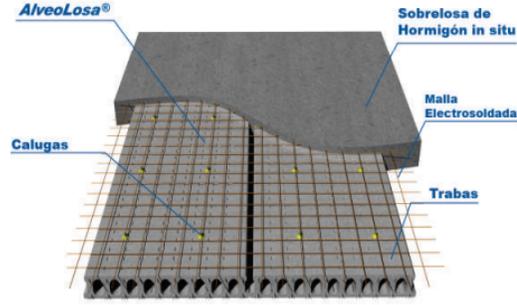
## Elementos de diseño: losas

De los Slabs previamente modelados se rescataron los momentos máximos (0.9 ton-m) a partir de los cuales se determinó el área de acero mínima a flexión ( $2.5\text{cm}^2/\text{m}$ ) cumpliendo con la cuantía mínima de  $0,0018H$  por retracción y fraguado.

Siguiendo los lineamientos de la industrialización se optan por soluciones prefabricadas, donde dentro del mercado chileno se encuentran las ofrecidas por la empresa Hormipret. Dos de las opciones se describen brevemente en la Tabla 3.34

Es de notar que en la parte superior de los muros deben existir ménsulas para dar apoyo a las losas según la luz máxima descrita por el fabricante.

Tabla 3.34: Opciones de losas prefabricadas. Fuente: Hormipret (2017)

PreLosa <sup>®</sup>	AlveoLosa <sup>®</sup>
	
<b>Diseño</b>	
<p>Elemento que posee cuatro nervios rigidizantes longitudinales y trabas de corte en la superficie que mejoran la adherencia con el hormigón que es vaciado in-situ. Apto para edificios en altura o extensión, de usos habitacional, comercial, deportivo, entre otros</p>	<p>Elemento autoportante, especialmente diseñado para construir losas de grandes luces en obras. Pueden soportar grandes sobrecargas y/o luces importantes: estacionamientos, bodegas, naves industriales, centros comerciales y de espectáculos, graderías, etc.</p>
<b>Tipología</b>	
Prelosas + casetones	Losas alveolares
<b>Materiales</b>	
Hormigón G45 + varillas de acero pretensadas de 1800MPa	
<b>Dimensiones comunes</b>	
<p>Ejes [cm]: de 60 a 120. Sobrelosa [cm]: de 5 a 20. Luces [ml]: de 1 a 15. Peso [kg/ml]: 95 a 368</p>	<p>Ejes [cm]: de 60 a 120. Sobrelosa [cm]: de 5 a 20. Luces [ml]: de 1 a 16. Peso [kg/ml]: 220 a 493</p>
<b>Sistema constructivo</b>	
	

## Elementos de diseño: conexiones

Para las conexiones se considera que su comportamiento debe asemejarse al que presentan las estructuras construidas in-situ, es decir, **conexiones emulativas fuertes**, con las que se tiene la disipación de energía de la estructura alejados de las conexiones. Se definen tres tipos de conexiones según los tipos de elementos que se conectan:

- CV: se refiere a las conexiones verticales entre muros.
- CN: está conformado por las conexiones que unen muros con vigas.
- CH: se refiere a las conexiones horizontales en muros.

Entre las **conexiones verticales CV** se distinguen dos tipos: CV1 que se refieren a la conexión entre módulos de muros en el mismo eje y CV2 que se refieren a muros que presentan una zona de intersección en forma "T". Estas se presentan en detalle en la Figura 3.11.

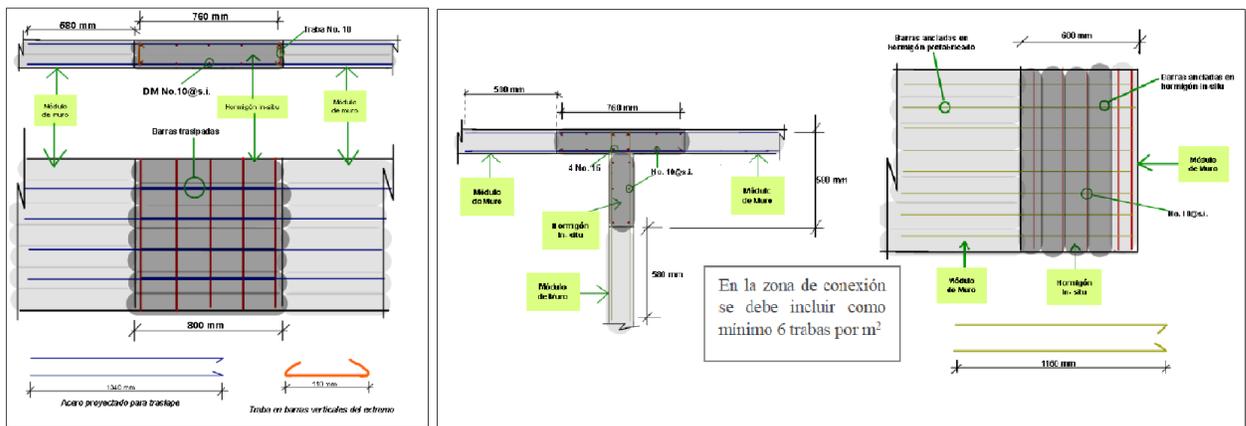


Figura 3.11: Detalle de conexión tipo CV1 (izquierda) y CV2 (derecha).

Fuente: Aguirre 2021.

Para las CV se utilizan barras  $\phi 10$ , con igual espaciamiento vertical y horizontal en la malla de los muros, teniendo una cuantía de acero cercana a 0.005 (susceptible a disminuir según el caso), lo que representa una mayor capacidad de corte en la zona de conexión al tener un 50% de aumento en la cuantía de acero.

Por otra parte, entre las **conexiones CN** se distinguen dos tipos: CN1 que se refiere a conexión de muro con viga colineales con el eje del muro, y CN2 que se refiere a conexión de muro con viga perpendicular al eje del muro. Estas se presentan en detalle en la Figura 3.12. Pese a la altura de la viga, la conexión contempla toda la altura de piso, procurando mantener en la zona una cuantía de acero equivalente a la de una construcción in-situ, agregando estribos para mejorar la capacidad de la conexión.

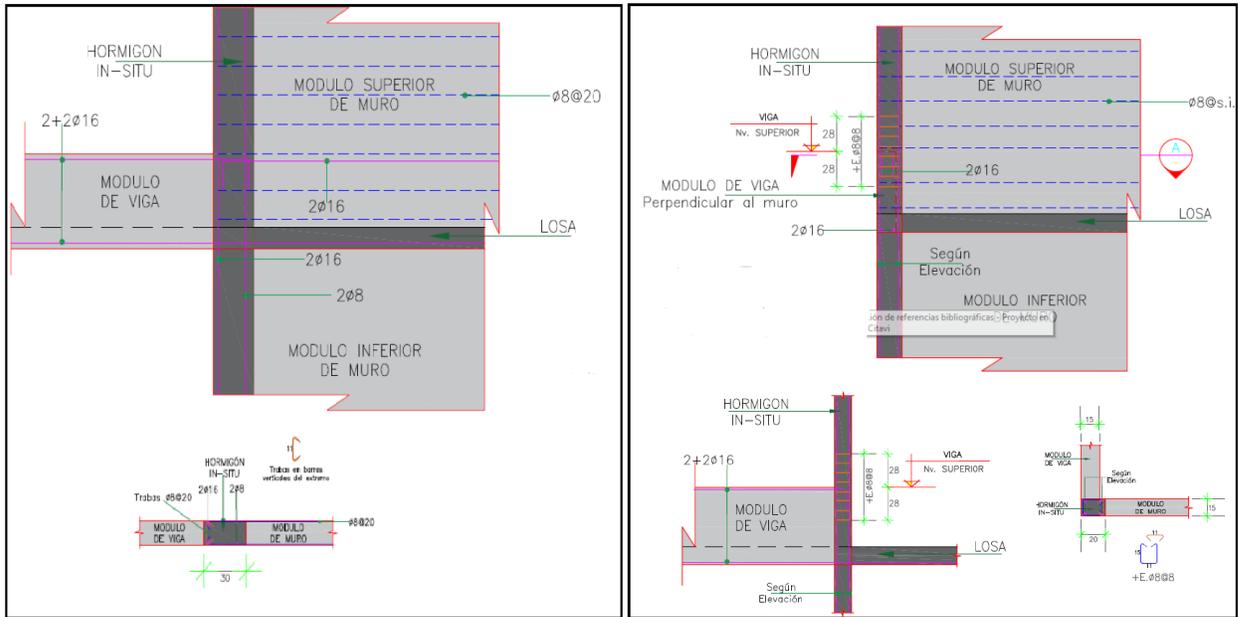


Figura 3.12: Detalle de conexión tipo CN1 (izquierda) y CN2 (derecha). Adaptado de Aguirre 2021.

Las **conexiones CH** emplean grout sleeves (GS) para empalmar el acero vertical de los muros. El diámetro y cantidad de barras que contiene el panel de muro define el diámetro del GS, según sus equivalencias y la zona de conexión. Es decir, para encuentros en el borde de muro se puede considerar la equivalencia entre  $4\phi 12$  de acero vertical original y  $2\phi 18$  de acero vertical de GS, en cambio para encuentros en zonas de intersección la equivalencia es entre  $4\phi 12$  de acero vertical original y  $1\phi 25$  de acero vertical de GS. En las Figura 3.13 se presenta la conexión en detalle.

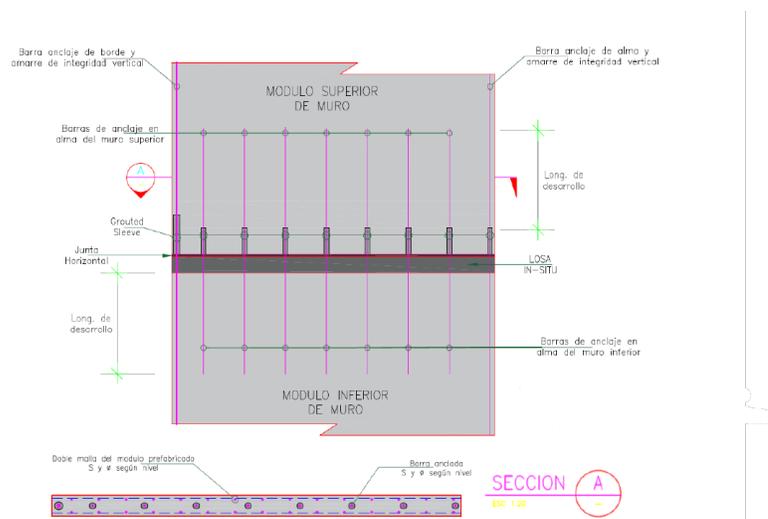


Figura 3.13: Detalle de conexión tipo CH. Fuente: Aguirre 2021.

En la Figura 3.14 se presenta un plano con la ubicación de las conexiones consideradas previamente.

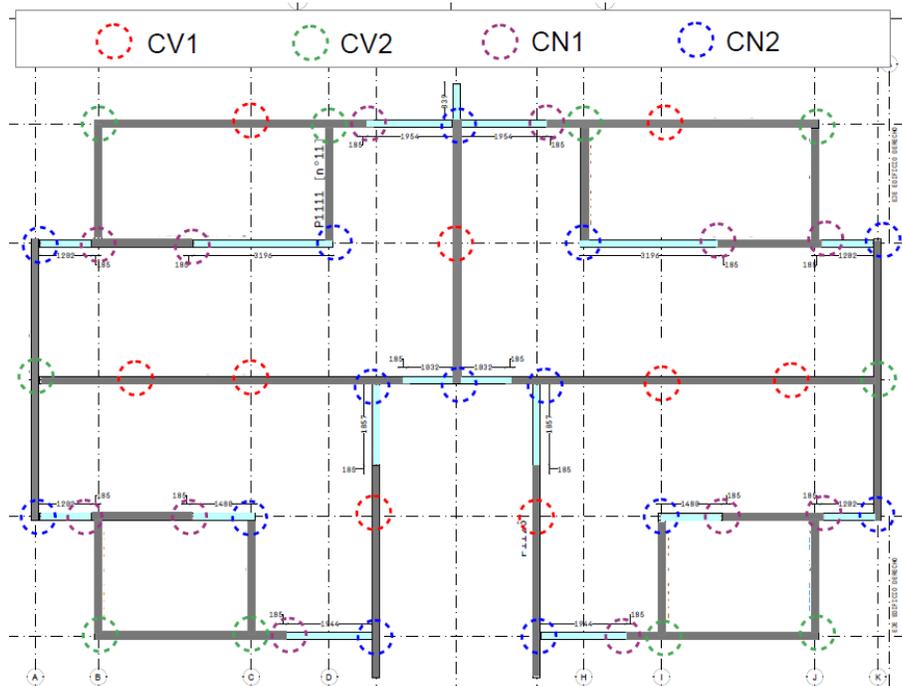


Figura 3.14: Disposición de las conexiones. Fuente: Elaboración propia.

## Ménsulas

Las ménsulas son elementos cuya relación entre el claro de cortante y el peralte es pequeña. Se utilizan generalmente en construcción para soportar vigas prefabricadas y/o para soportar elementos de grandes dimensiones o equipo pesado. En el ACI318S-14 se presenta un método de diseño que permite calcular las armaduras de refuerzo en ménsulas, las cuales siguen el detallamiento presentado en la Figura 3.15.

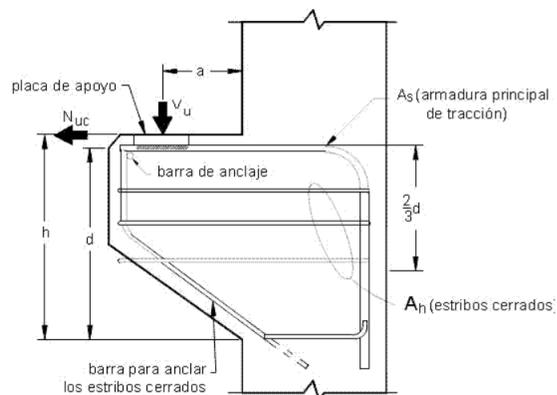


Figura 3.15: Refuerzos en ménsulas Fuente: NTIC.

## 3.7. Durabilidad

La durabilidad de las estructuras depende de diferentes factores, entre ellos, del tipo de material que las componga ya que cada tipo de material presenta diferentes propiedades por lo que requieren de diferente conservación. El concepto se relaciona con la capacidad de la estructura a soportar durante su vida útil las diferentes condiciones físicas y/o químicas a las que se verá expuesta. Se puede considerar una capacidad óptima si cumple con el objetivo de estabilidad y resistencia sin perder en exceso su utilidad.

Por su parte, la vida útil de una estructura implica un periodo de tiempo, que va desde su puesta en servicio, manteniendo su funcionalidad, seguridad y aspecto. Para tener una idea, el SII presenta una tabla de “Vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado”, donde se indica que las estructuras de hormigón armado pueden considerar una vida útil que va desde 80 a 50 años, dependiendo de sus características, en cambio para construcciones de madera en general se definen 30 años.

La capacidad de soporte de una estructura no es constante en el tiempo, por lo que se deben considerar reparaciones que permitan recuperar sus condiciones iniciales. En particular para este trabajo de investigación, se excluyen los daños ocasionados por falencias en la construcción o en el diseño de la estructura. Cabe destacar que a pesar de que el hormigón es un material que presenta buenas características frente a daños, resulta importante protegerlo ante ataques de agentes exteriores como erosión, heladas, ácidos, sulfatos, cloruros, entre otros agentes químicos o físicos. Esto se aplica de igual forma a la madera, que además sufre por humedad y agentes biológicos como las termitas, lo cual se trata mediante el proceso de impregnación.

### Estructuras de hormigón

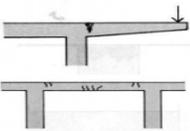
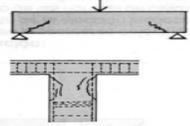
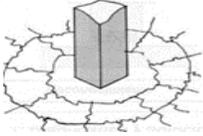
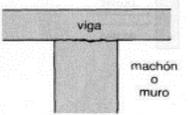
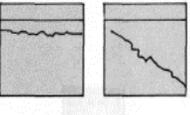
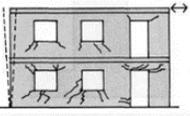
Según el informe “Técnicas de reparación y refuerzo de estructuras de hormigón y albañilería” del instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, a pesar del excelente comportamiento del hormigón armado ocasionalmente sufre daños por sobrecargas o sismos, que también pueden aparecer cuando la estructura excede su tiempo de vida útil.

Desde el punto de vista de durabilidad la falla original puede ser causa de fallas menores, como la corrosión, por lo que es necesario describir procedimientos para una reparación exitosa y rápida de la obra, para ello se describen a continuación los tipos de fallas de manera de explicitar la importancia, origen y sus consecuencias.

- Deterioro superficial: Pequeña profundidad (<5cm) y extensión grande.
- Grietas: Rotura del elemento producto de tensiones internas, pueden ser muertas (si la causa que la originó ha desaparecido) o vivas.
- Fracturas: Conjunto de fallas con mayor intensidad cortando o deformando la armadura por lo que resulta necesario reemplazar parcial o totalmente el elemento.
- Corrosión en armadura: Se genera fisuras o fracturas debido al aumento de volumen de la armadura al oxidarse.

En la Tabla 3.35 se presentan las causas y reparaciones de algunas de las fallas comunes en hormigón.

Tabla 3.35: Fallas comunes en estructuras de hormigón.

Descripción	Causas	Reparación
<b>Grieta por flexión</b>		
	<p>Sobrecarga imprevista</p> <p>Deformación excesiva</p> <p>Cuantía insuficiente</p> <p>Mala adherencia de armadura</p> <p>Mala disposición de armaduras</p>	<p>Inyección de grietas</p> <p>Colocación de acero</p> <p>Reemplazo</p>
<b>Grieta por corte</b>		
	<p>Sobrecarga imprevista</p> <p>Estribos insuficientes</p> <p>Inadecuada calidad del hormigón</p>	<p>Inyección de grietas</p> <p>Colocación de acero</p> <p>Reemplazo del elemento</p>
<b>Punzonamiento</b>		
	<p>Concentración de tensiones</p> <p>Armadura o espesor insuficiente</p> <p>Baja calidad del hormigón</p>	<p>Inyección de grietas o reparación superficial</p> <p>Aumento de sección</p>
<b>Falla en la junta</b>		
	<p>Defecto en la junta</p> <p>Defecto de anclaje</p> <p>Mala adherencia</p>	<p>Inyección de grietas o reparación superficial</p> <p>Aumento de sección</p> <p>Reemplazo</p>
<b>Grieta en junta o por corte en muro</b>		
	<p>Esfuerzos excedidos</p> <p>Defecto en la junta</p> <p>Insuficiencia de armaduras</p> <p>Asentamiento diferencial</p>	<p>Inyección de grietas</p>
<b>Agrietamiento general en muros</b>		
	<p>Armadura insuficiente</p> <p>Mala calidad del hormigón</p>	<p>Inyección de grietas</p>
<b>Corrosión de armadura / Carbonatación</b>		
	<p>Mal diseño</p> <p>No corrección de grietas a tiempo</p> <p>Porosidad del hormigón</p> <p>Medio ambiente agresivo</p>	<p>Inyección de grietas</p> <p>Colocación de acero</p> <p>Reemplazo</p> <p>Protección contra agentes medioambientales</p>

Las **técnicas de reparación** se dividen en 4 grandes grupos:

1. Inyección de grietas (recuperación de monolitismo): Estas pueden ser gravitacionales o a presión. Las gravitacionales se aplican generalmente a losas o elementos horizontales con grietas muertas mayores a 1mm y consiste en primer lugar en limpiar con aire comprimido, luego aplicar un sello con masilla epóxicas en la cara inferior del elemento y diques laterales en la cara superior para finalmente vaciar el epoxi con suficiente viscosidad para que fluya por gravedad al interior de la grieta. En el caso de la inyección a presión se pueden tratar grietas en cualquier posición y abertura siempre que se regule adecuadamente la viscosidad. Para ello se realiza la limpieza, luego se sella la parte superficial de la grieta con masillas epóxicas dejando espacio para la colocación de boquillas para finalmente impulsar el epoxi mediante aire comprimido o presión manual.
2. Reparaciones superficiales: Estas pueden ser manuales o con mortero proyectado y se aplican a fallas de espesores reducidos (hasta el recubrimiento de la armadura). La manual consiste en aplicar cortador angular para definir bordes, eliminar por picado todo el hormigón defectuoso hasta obtener una geometría adecuada, luego se realiza una limpieza para la posterior aplicación de lechada de adherencia y finalmente proyectar manualmente un mortero semi-plástico alisando y compactando hasta alcanzar el acabado deseado cuidando el curado por 7 días. El mortero proyectado se aplica para superficies extensas o repetitivas, este sigue un procedimiento similar al anterior con la diferencia de que se puede usar chorro de arena para facilitar la limpieza y se aplica el mortero a presión mediante una maquina lanzadora. Este método también sirve cuando se requiere agregar armaduras adicionales o mallas de refuerzo.
3. Reemplazo de hormigón: Esto se usa en juntas defectuosas, elementos cortados, entre otros y el procedimiento es en primer lugar alzaprimar, posteriormente picar todo el hormigón defectuoso y regularizar las superficies para finalmente colocar el mortero
4. Colocación de acero de refuerzo:
  - Colocación de armaduras adicionales: en primer lugar, se demuele parcial o totalmente el elemento en la zona a reforzar aumentada según se requiera por adherencia o empalme alzaprimando de ser necesario, luego se colocan los refuerzos y estribos según el cálculo para finalmente hormigonar.
  - Colocación de anclajes con epoxi: se realiza una perforación según la longitud y diámetro requeridos, luego se limpia la perforación y finalmente se rellena con epoxi o masillas e insertan los fierros fijándolos hasta el endurecimiento de la resina.
  - Refuerzos externos: Consiste en fijar pletinas de acero a estructuras existentes de hormigón mediante resinas epóxicas para aumentar la cuantía de acero. Debe alzaprimarse el elemento para que puedan trabajar. El procedimiento consiste en desbastar la capa superficial de hormigón garantizando que quede plana, luego se emplea una masilla epóxica adhesiva en ambas caras en conjunto con las pletinas.
  - Insertos superficiales: se utilizan para reponer o aumentar armaduras y mejorar anclajes. En primer lugar, se realizan ranuras donde irán las armaduras con un cortador angular y se pica el borde exterior de la armadura existente, luego se coloca la nueva armadura anclada a la existente respetando los empalmes y se rellena con mortero epóxico.

## Estructuras de madera

Los principales **problemas** que se evidencian en estructuras de madera se deben a:

- Plagas: La exposición ante agentes degradantes como Hongos, Xilófagos y termitas que consumen y deterioran a los elementos de madera.
- Humedad: La madera al ser un material higroscópico por naturaleza absorbe agua la exposición ante el agua puede afectarla causando deformaciones que disminuye su capacidad estructural sin mencionar de crear un ambiente propicio para plagas.
- Grietas: Se producen por exceso de sobrecargas o falta de mantenimiento preventivo.
- Radiación solar: La constante exposición al sol produce oxidación del carbono en las fibras más exteriores facilitando la aparición de microorganismos.
- Calidad de material: Elementos de madera con características inadecuadas.

Para los problemas mencionados anteriormente se pueden considerar diversas **soluciones**, considerando que el paso previo y común de toda rehabilitación consiste en realizar una limpieza de la zona removiendo las partes deterioradas e impregnar las que están en buenas condiciones con agentes protectores. Por una parte, en caso de pequeñas lesiones con poca pérdida de material se pueden reparar puntualmente los elementos, con acciones como: sellado de grietas, aplicación de pinturas o espumas protectoras, inyección de insecticidas, e impermeabilización.

Por otra parte, en caso de pérdidas significativas de las características de los elementos se hace necesario reforzar o sustituir elementos, con acciones como:

- Sustitución física: Consiste en la completa eliminación o sustitución del elemento dañado por uno que aporte capacidades iguales o superiores que pueden ser de hormigón armado, acero o madera.
- Sustitución funcional: Consiste en añadir nuevos elementos o realizar un cambio en la configuración estructural para soportar las cargas de los elementos dañados.
- Refuerzos: Consiste en devolver la capacidad portante del elemento para que vuelva a cumplir su función.
- Añadidura de perfiles metálicos (creando una sección compuesta), o de elementos transversales a las vigas para limitar flechas (vigas secundarias), y/o inclusión de elementos metálicos o fibra de vidrio embebidos en la madera empleando resinas epoxi.
- Uso de planchas o pletinas en la parte inferior de las vigas, o de chapas metálicas en 2 o más caras (clavados o atornillados), y/o aplicación de uniones encoladas con espigas.

Una primera observación de la información abordada en este capítulo permite considerar que, **pese a que ambos materiales presenten diferentes comportamientos, son capaces de resistir estructuralmente las cargas y combinaciones de diseño adecuadamente**, y además pueden cumplir con la vida útil para las que son diseñadas. Por una parte, la madera reduce el peso de la estructura, por lo que disminuye su corte basal pero a la vez sufre mayores deformaciones, y por el contrario, el hormigón ofrece una certera fiabilidad en su desempeño sísmico pero viene acompañado de menor resiliencia. *Este punto es planteado en detalle en próximos capítulos.*

# Capítulo 4

## Aspectos fundamentales de la resistencia al fuego

### 4.1. Fundamentos de la resistencia al fuego

#### Objetivos de la Resistencia al Fuego (RF)

La resistencia al fuego (RF) de un elemento de construcción es una medida de su habilidad de soportar los efectos del fuego en una o más formas. Principalmente, se considera que el dimensionado de la RF de una estructura busca que esta se mantenga estable el tiempo suficiente para evacuar el edificio. Entre los objetivos del porqué darles RF a los elementos estructurales, se pueden destacar:

- Controlar la propagación del fuego al interior de la edificación, esto permite aumentar los tiempos permitidos para evacuación, reducir el impacto del fuego en la estructura limitando las zonas de daño, aislar riesgos y proteger rutas de escape.
- Controlar la propagación del fuego entre edificaciones, esto mediante una apropiada RF de la fachada y muros exteriores.
- Prevenir colapsos estructurales, esto mediante el correcto uso y diseño de la RF de los elementos portantes, los cuales deben mantener su estabilidad durante el tiempo previamente estipulado. Esto es esencial para salvaguardar la vida humana y para tener la posibilidad de una reparación de la edificación.

Cabe destacar que la resistencia al fuego es sólo uno de los componentes de toda la estrategia general de incendios. En particular, la RF de los elementos estructurales se diseña para que las temperaturas del incendio sean resistidas por la estructura, con tal de controlar la propagación del fuego y/o para prevenir el colapso estructural, dependiendo de su función.

#### Protección activa y pasiva

La protección contra incendios está dividida en dos grandes áreas:

- Protección pasiva: Se relaciona con elementos de construcción que por sus condiciones físicas aíslan la estructura de un edificio de los efectos del fuego durante cierto tiempo. Es decir, corresponden a la disposición de materiales y elementos constructivos de manera que estos puedan entregar cierto nivel de seguridad frente a un incendio.

- Protección activa: Se considera como un complemento a la protección pasiva y habitualmente se trata de dispositivos de detección que activan sistemas de alarma y extinción.

Existe un gran número de normas chilenas e internacionales a considerar, algunas obligatorias por la OGUC, en la seguridad contra incendios. Entre ellas se tienen **normas sobre comportamiento al fuego** en cuanto a pinturas y su determinación del retardo al fuego (NCh1974), así como también de determinación del comportamiento de revestimientos textiles a la acción de una llama (NCh1977) y de determinación del comportamiento de telas a la acción de una llama (NCh1979). Además, existen **normas sobre señalización en edificios**, como señales de seguridad (NCh2111) y condiciones básicas (NCh2189), y **normas sobre elementos de protección y combate contra incendios** relacionados a los extintores portátiles, considerando su terminología, definiciones, características y rotulación (NCh1429 y NCh1430). Así como también **normas sobre rociadores automáticos** (NCh2095).

### Curva normativa «temperatura-tiempo» y carga del fuego

El incendio es un fenómeno complejo que depende del tipo y cantidad de materiales inflamables, y de la ubicación y condiciones del medio como temperatura, presión, composición de la atmósfera, dirección del viento, humedad relativa. En cada incendio se pueden distinguir las características particulares de este, como la temperatura máxima, la cantidad y velocidad de calor producido, la velocidad de la combustión, el tiempo de la duración del incendio y la velocidad con la cual aumentan las temperaturas. Para este fenómeno se pueden distinguir tres fases principales:

1. Fase inicial: Depende de la fuente de encendido y del material, generalmente dura de 3 a 50 minutos.
2. Fase de las temperaturas máximas: En esta fase la estructura se halla más expuesta a las deformaciones duraderas, e incluso a su destrucción ya que las temperaturas pueden oscilar entre 600° y 1.300° C.
3. Fase de la extinción: Tras llegar al equilibrio térmico en la segunda fase, los gases volátiles del material combustible están agotados, lo que produce la extinción del incendio.

Para obtener las condiciones comparables, los elementos son examinados en hornos de laboratorio, donde se encuentran sujetos a la acción del fuego según la curva normativa «temperatura-tiempo».

Por otra parte, la **carga del fuego** corresponde a la cantidad de calor que pueden desprender los materiales combustibles, utilizados en la edificación, en el curso de un incendio. Este potencial calorífico está expresado, en general, en megacalorías por metro cuadrado de forjado (Mcal/m<sup>2</sup>). Para unificar la determinación de la cantidad del material combustible que corresponde por superficie dada, se utiliza como equivalente la cantidad de madera cuyo calor, promedio de combustión, es igual a 4.400 kcal/kg. Según las normas inglesas y americanas (Fire Grading of Building), la carga del fuego equivalente a la intensidad del incendio de 1 hora es igual a 217.000 kcal/m<sup>2</sup>, es decir, 50 kg/m<sup>2</sup> de madera de un valor térmico promedio de 4.400 kcal/kg. [4] En el caso chileno, la OGUC señala en la Tabla 3 de su Artículo 4.3.3 llamado "Los edificios que conforme a este Capítulo requieran protegerse contra el fuego", indica que 1MJ/m<sup>2</sup>=238.85 kcal/m<sup>2</sup> y 1MJ = 0.053kg madera equivalente de 4.000 kcal/kg.

## Comportamiento del hormigón armado

El hormigón estructural, armado y pretensado, combina el material acero de las armaduras y el material hormigón que conforma el elemento estructural y que, mediante el espesor del recubrimiento, separa al acero del exterior. Pese a que ambos sean materiales no combustibles, su conductividad térmica varía enormemente, por una parte, el acero tiene una alta conductividad térmica por lo que, al verse expuesto al fuego, es capaz de adquirir la temperatura del incendio de forma casi inmediata y conducirla por toda su sección. Por otra parte, el hormigón tiene una baja conductividad térmica por lo que se calienta mucho más lentamente alcanzando temperaturas, en el interior de la misma, inferiores a las que, en ese instante, se alcanzan en el incendio. Es por esto que el dimensionado de las estructuras frente al fuego pasa por la necesidad de proteger al acero y a su vez el hormigón es una buena protección para este.

Bajo la presencia de altas temperaturas, el acero disminuye sus cualidades fundamentales (resistencia a la tracción, límite de elasticidad y módulo de elasticidad) de forma no lineal, por lo que resulta primordial su protección. Cuando las barras de acero se encuentran con un recubrimiento adecuado y frente a la acción de un fuego de poca duración, mediante la cual el acero no llegue a la temperatura de 400° C, mantiene sus propiedades fundamentales, por lo que existen posibilidades de reparación de los forjados, pudiéndose evitar un cambio total. En la Figura 4.1 se presenta una tabla que indica la temperatura que alcanzaría un acero estructural sin protección y aquella que alcanzaría una losa de hormigón de 10 cm de espesor a diversas profundidades, medidas desde la superficie exterior que sufre el incendio.

Tiempo t (minutos)	Temperatura alcanzada (° C)			
	En el incendio	En el acero estructural sin protección	En la armadura con un recubrimiento r (mm)	
			r = 30	r = 45
30	815	815	205	140
60	925	925	370	270
90	990	990	490	350
120	1030	1030	570	425
150	1070	1070	620	490
180	1100	1100	660	510

Figura 4.1: Temperatura alcanzada por el acero según su recubrimiento y en función del tiempo[5].

Por su parte, el hormigón disminuye su resistencia a la tracción, y su módulo de elasticidad. En su fase inicial (100-130°C) se elimina el agua químicamente libre, para luego con el aumento de temperatura (350°C) comenzar a separar el agua químicamente unida, hasta los 600°C, temperatura a la cual el volumen de hormigón aumenta, originando roturas en el elemento constructivo.[4] En la Figura 4.2 se presenta un gráfico que muestra como el hormigón, bajo la influencia de altas temperaturas, disminuye su resistencia a la tracción  $R_e$  y su módulo de elasticidad  $E_b$

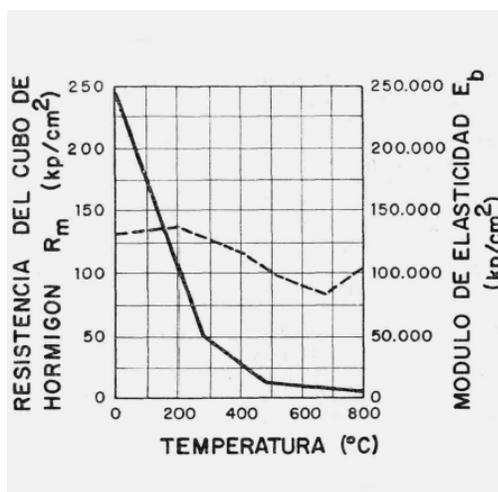


Figura 4.2: Disminución de las propiedades del hormigón frente a altas temperaturas[4].

A partir de información entregada en el Eurocódigo 2: Diseño de estructuras de hormigón, se indica la pérdida de resistencia a tracción del acero de la armadura ( $f_{yk}$ ) de un hormigón armado y de la resistencia a compresión del propio hormigón con árido silíceo ( $f_{ck}$ ), en función de la temperatura alcanzada por el material. Con lo que se puede concluir que la resistencia de los materiales cuando alcanzan una temperatura de 500° C se reduce al 70 % de la que presentan a 20° C. [5]

Con base en el Documento “Seguridad y protección completa frente al fuego con hormigón” de la Plataforma Europea del Hormigón, se pueden considerar el siguiente comportamiento:

- El hormigón no es combustible, por tanto, no se suma a la carga de fuego del edificio, no alimenta el fuego ni contribuye a que el incendio se extienda. Con esto, ofrece resistencia pasiva frente al fuego y por tanto es capaz de ofrecer la estabilidad estructural y evitar el colapso del edificio incluso en condiciones de incendios muy severos.
- Las estructuras de hormigón ofrecen una elevada robustez en su comportamiento frente al fuego, facilitando la lucha contra el incendio en condiciones de estabilidad estructural y evitando los elevados daños, propios y colaterales, que producen el derrumbamiento de un edificio. Esto se traduce en la reducción de las consecuencias del incendio y en evitar las pérdidas humanas y patrimoniales.
- El hormigón es un material muy resistente al fuego, por lo que en general no requiere de capas protectoras, sin embargo, se debe considerar los grosores y recubrimientos normativos. Al no necesitar de capas de protección, evita los costos de mantenimiento de las mismas, y ofrece seguridad frente al fuego de modo permanente, incluso durante la construcción.
- El hormigón no se degrada por efecto del agua utilizada durante la extinción del incendio, y dado su comportamiento, resultan factibles las reparaciones, y en consecuencia la vuelta a la actividad del edificio incendiado.

## Comportamiento de la madera

De forma contraria al hormigón, la madera es un material combustible, que al estar frente a altas temperaturas (superiores a 120°C) comienza un proceso de deterioro químico, originando carbón y gases inflamables. La ignición de la madera crea en su piel exterior una capa de carbonización, la que aísla al resto de la madera de, entre otras cosas, la entrada de aire con oxígeno. Al no haber oxígeno, no hay combustión. Además, la velocidad de carbonización disminuye a medida que aumenta la capa carbonizada. Por lo que, aunque la resistencia mecánica del carbón disminuya, el resto interior de la pieza sigue intacta. Con esto se tiene que la pérdida de capacidad portante de la estructura se debe a una simple reducción de la sección, más que a una pérdida de resistencia del material. Es decir, su baja conductividad da una importante resistencia al fuego cuando las secciones de los elementos de madera son de un tamaño considerable, como ocurre con la madera laminada.[6] Es por esto que generalmente, en el caso de construcciones, el fuego afecta principalmente a la capa más exterior y por ende se suelen sobredimensionar estas capas para que mientras se queman, el interior pueda resistir la carga de la estructura durante más tiempo.

La **velocidad de carbonización** es una propiedad interesante para el desarrollo de criterios analíticos de diseño contra el fuego. Esta ha sido determinada en diversos estudios, dependiendo principalmente de la densidad, permeabilidad y contenido de humedad de la madera; así como también del método de análisis. Un método experimental común para su determinación es someter piezas de madera a las condiciones normalizadas de incendio, verificando la penetración de la carbonización luego de un cierto tiempo de exposición (0-29 minutos, 0-60 minutos y 29-60 minutos). En un trabajo experimental realizado por CERFOGLI (2018) se concluyó que, para el caso de las especies madereras de Pino Radiata, Pino Oregón y Roble resulta confiable usar los valores correspondientes especificados en el Eurocódigo, EN 1995-1-2. Sin embargo, no recomienda utilizar las velocidades del Eurocódigo en el caso de MLE de pino radiata, ya que estos son algo menores a los obtenidos mediante los métodos de Ancho Residual y Rectángulo Equivalente. En la Tabla 4.1 se muestran velocidades obtenidas en estudios experimentales nacionales y las indicadas en el EN 1995-1-2.

Tabla 4.1: Velocidades de carbonización, diversos trabajos.

		Velocidad de carbonización (mm/min)		
		Estudios nacionales		Europa
Especie maderera	Método de análisis	RAMIREZ 2001	CERFOGLI 2018	Eurocódigo
Pino radiata	Ancho residual	0,87	0,7	0,8
	Regresión lineal		0,59	0,8
Pino oregón	Ancho residual		0,627	0,8
Roble	Ancho residual	0,69	0,39	0,55
MLE	Ancho residual		0,776	0,7
	Rectángulo equivalente		0,782	0,7
MLE con adhesivo uréico	Ancho residual	0,77		
MLE con resorcinol	Ancho residual	0,89		

El estudio experimental realizado por RAMIREZ (2001), obtuvo también la velocidad de carbonización para madera de Álamo de 403 kg/m<sup>3</sup> de densidad es de 1,08 mm/min; mientras que la velocidad de carbonización de la madera de Roble de 818 kg/m<sup>3</sup> de densidad es de 0,69 mm/min.

## 4.2. Normativas nacionales e internacionales

### Requerimientos y diseño

Según la normativa de Chile (OGUC), la resistencia al fuego requerida para elementos de construcción en viviendas se clasifica según el tiempo necesario para realizar una evacuación de los habitantes en caso de incendio, se denomina con 'F-' y un número N, el cual indica la cantidad de tiempo, en minutos, necesaria para la evacuación. Este requerimiento es independiente a la materialidad, y considera las múltiples capas constructivas, ya que el conjunto de capas contribuye y constituye la RF final del elemento de construcción. Además, depende del número de pisos y del uso destinado de la edificación, de la función particular del elemento constructivo, de la superficie edificada, o la carga de ocupación, o la densidad de carga combustible.

En particular para el caso en estudio, el destino de la edificación es habitacional, por lo que según la Tabla 1 del Artículo 4.3.4. de la OGUC, sin importar la superficie edificada, al tener 4 pisos corresponde a tipo c. Por ende, la RF requerida para los elementos de construcción de edificios se presenta en detalle en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Resistencia al fuego requerida para los elementos de construcción de edificios tipo c. Fuente: OGUC

1	Muros Cortafuego	F-120
2	Muros zona vertical de seguridad y caja de escalera	F-90
3	Muros caja ascensores	F-60
4	Muros divisorios entre unidades (hasta la cubierta)	F-61
5	Elementos soportantes verticales	F-62
6	Muros no soportantes y tabiques	-
7	Escaleras	F-15
8	Elementos soportantes horizontales	F-60
9	Techumbre incluido cielo falso	F-30

Cabe destacar que en la actualidad el IDIEM ha sido encargado de desarrollar un anteproyecto de norma que busca incorporar modelos analíticos y prescriptivos de cálculo de resistencia al fuego para estructuras de madera, con el objetivo de generar una metodología de cálculo que permita diseñar estructuras y edificios de madera que cumplan con los requerimientos de resistencia al fuego exigidos por la OGUC. Para esto se están estudiando las normativas nacionales e internacionales con enfoque particular en el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-2), pero también, se considera la normativa australiana, canadiense y estadounidense. En este sentido, los métodos de cálculo internacionales para estimar la resistencia al fuego son adaptables a las características de las estructuras nacionales, logrando buenos resultados y manteniendo la seguridad, lo que implica la necesidad de realizar estudios experimentales y teóricos, para la correcta adaptación de una metodología de cálculo a nivel nacional, que permita estimar la resistencia al fuego[7].

El Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera Parte 1-2: Reglas generales Proyecto de estructuras sometidas al fuego, trata en particular del cálculo de estructuras de madera en la situación accidental de exposición al fuego, y se establecen 3 requisitos de comportamiento: capacidad portante, integridad y aislamiento térmico. Esta norma se aplica a las estructuras de edificación en las que, por razones de seguridad generales frente al incendio, requieren el cumplimiento de ciertas funciones en la exposición al fuego, en términos de evitar un colapso prematuro de la estructura y limitar la propagación del fuego. En cuanto a estos requisitos y regulaciones, si bien existen similitudes respecto al caso chileno y los requerimientos de resistencia al fuego de las estructuras por periodos de tiempo determinado, si se hace una diferencia en lo que respecta a la propagación de fuego y humo y que la normativa chilena no detalla en forma acuciosa (Ostman Kallsner, 2011).

En Estados Unidos la entidad análoga a la OGUC corresponde a la National Fire Protection Agency (NFPA), la cual se encargada de crear, mantener y establecer normas y requisitos mínimos para la prevención contra incendios. En el trabajo de memoria para optar al título de ingeniero civil de Rodrigo Ignacio José Macari Lagos que lleva por nombre “Criterios que determinan los requerimientos de resistencia al fuego de elementos estructurales” (2015)[8], se determinan los fundamentos científico-técnicos que hay detrás de los requerimientos de RF de los elementos estructurales, indicados en las normativas y legislaciones nacionales y norteamericanas. En esta se concluye:

- La normativa chilena se encuentra atrasada en ciertos ámbitos, como lo es en la construcción en altura, el uso de subterráneos, y el uso de rociadores.
- Para la NFPA el uso de rociadores es un factor importante al momento de establecer los requerimientos de RF, todo tipo de edificio sin importar el destino tiene distintas exigencias dependiendo de si se usan o no. La OGUC establece sus requerimientos sin importar si se usan o no rociadores y sólo establece en algunos casos la obligatoriedad de su uso.
- La NFPA considera diversos factores adicionales a los mencionados por la OGUC, que pueden variar las exigencias de RF de los elementos estructurales. A modo de ejemplo, se menciona la distinción entre muros y columnas, a diferencia de la calificación de *Elementos soportantes verticales*. Así como también, se considera si los muros están soportando un piso, dos o más pisos o solo el techo, o si los muros son interiores o exteriores.

En el caso australiano, sus códigos normativos permitían construcciones de madera de máximo 3 pisos de altura, sin embargo, esto cambió en 2016 tras la actualización de su National Construction Code, permitiendo edificaciones en madera de hasta 8 pisos o 25 metros, sin la necesidad de realizar una revisión prestacional a través de proyectos adicionales de ingeniería (Forestal Maderero, 2017). Para el caso de edificios de mayor altura se solicita un estudio de requerimientos prestacionales y estándares asociados. En su normativa, al igual que en Chile, se considera que la resistencia al fuego requerida dependerá de la altura del edificio, el uso y tipo de ocupación, la inclusión de rociadores, vías de escape y otros factores. Sin embargo, también presenta sus diferencias respecto al caso chileno, permitiendo a un proyecto poder diferir de los requisitos de las disposiciones prescriptivas, si un ingeniero de incendios proporciona un diseño de seguridad ante incendios adecuado como solución alternativa (WoodSolutions, 2016).

## Curva Tiempo-Temperatura

La curva tiempo-temperatura varía dependiendo de la normativa. En Chile, se presenta la curva en la **NCh935/1 Of.97 – Ensayo de resistencia al fuego, Parte 1: Elementos de construcción en general**, la cual se rige por la ecuación 4.1.

$$T - T_0 = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (4.1)$$

Donde:

t = Tiempo expresado en minutos contados desde el inicio del ensayo.

T = Temperatura del horno en el instante t, medido en grados Celsius.

$T_0$  = Temperatura inicial del horno, medido en grados Celsius.

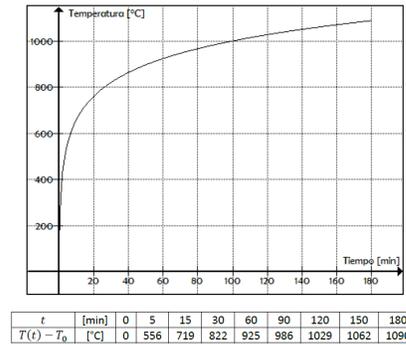


Figura 4.3: Curva Tiempo-Temperatura, NCh935.

Por un lado, la curva tiempo-temperatura del código europeo EN 1363-1 sigue la misma ecuación 4.1, sin embargo, considera una  $T_0$  fija e igual a 20. Por otro lado, en la norma ASTM E119-16a, no sigue una ecuación, sino que se tabulan las temperaturas a partir de rangos de tiempo. En la Figura 4.4 se muestra una comparación entre la norma ASTM y la NCh 935, realizada por CERFOGLI (2018) en la que se observa una concordancia muy alta entre estas, ya que ambas provienen de la normativa ISO 834, y sus valores han sido adoptados por países como Estados Unidos, Australia y Nueva Zelanda.

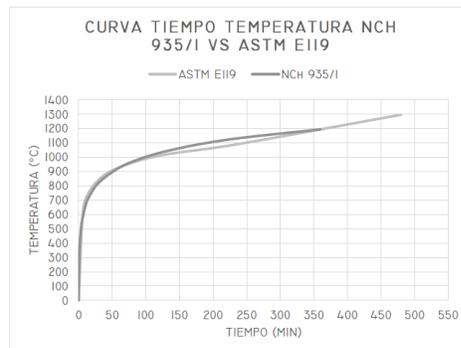


Figura 4.4: Comparación entre curvas (CERFOGLI (2018)).

### 4.3. Ensayos de resistencia al fuego

Los ensayos de resistencia al fuego (RF) tienen como finalidad conocer si los elementos a utilizar en la obra cumplen con los requerimientos normativos, los cuales indican la mínima resistencia solicitada. En el caso chileno, el procedimiento establecido para la realización del ensayo se encuentra especificado por la INN es su norma NCh 935/1, la cual tiene como objetivo establecer las condiciones de ensayo y los criterios que permiten determinar la resistencia al fuego de elementos de construcción en general. Algunas exigencias consisten en que el elemento a ensayar se debe analizar en condiciones normales de trabajo a fin de reproducir, durante el ensayo, un sistema similar de empotramiento, apoyos y cargas a las que será sometido, también se indica que los elementos a ensayar deben tener su tamaño real, sin partes recortadas, ni elementos reproducidos a escala y las dimensiones mínimas para elementos verticales y horizontales.

Estos ensayos no pretenden simular un incendio real, sino que establecen un método estándar de comparación entre el comportamiento frente al fuego de los elementos estructurales, lo que depende principalmente del material primario con el que se realice la construcción (hormigón o madera). Es por esto que para la ejecución del ensayo se debe contar con un horno capaz de exponer al elemento en ensayo, por una de sus caras, a las condiciones de temperatura indicadas por la curva normalizada tiempo - temperatura. Adicionalmente, es necesario un sistema de sobrecarga mecánica e instrumentos de medición y monitoreo de temperatura como termocuplas, sensores de infrarrojo y manómetros.

El elemento a ensayar se debe analizar en condiciones normales de trabajo a fin de reproducir, durante el ensayo, un sistema similar de empotramiento, apoyos y cargas a las que será sometido. En caso de que las condiciones de servicio sean inciertas se utilizará un apoyo simple. Los elementos que no soporten carga no deben ser sometidos a una carga externa durante el ensayo. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 4.5 el ensayo de una estructura de entrepiso y de un muro.



Figura 4.5: Ensayo NCh 935/1, estructura entrepiso (a la izquierda) y muro (a la derecha). Fuente: Idiem, 2018.

La RF de un elemento, debe juzgarse según los criterios de falla. Los criterios utilizados por el IDIEM son los siguientes:

- Capacidad de soporte de carga: Instante en que el elemento no puede seguir cumpliendo la función de soporte de carga para el cual fue diseñado.
- Aislamiento térmico: Instante en que la temperatura de la cara no expuesta alcanza los 180 [°C] puntual o 140 [°C] promedio, por sobre la temperatura ambiente registrada al inicio del ensayo, o si sobrepasa los 220 [°C] cualquiera sea la temperatura inicial.
- Estanquidad: Instante en que una llama (o gases a alta temperatura), se filtra por las uniones o por grietas o fisuras formadas durante el ensayo, y se sostiene por 10 o más segundos. En el caso de filtración de gases, hay pérdida de estanquidad si al colocar una mota de algodón en la filtración, esta enciende.
- Emisión de gases inflamables: Instante en que los gases emitidos por la cara no expuesta arden al aproximar una llama cualquiera y continúan espontáneamente ardiendo al menos durante 20 [s] de retirada la llama.

Finalmente, con esta información se establece la clasificación de un sistema o elemento constructivo (F0, F15, F30, etc).

Para garantizar la resistencia al fuego en Chile se requiere y presenta la siguiente documentación:

- Listado Oficial de Comportamiento al Fuego, MINVU-2014, el cual corresponde a un listado que reconoce únicamente a las soluciones de fuego inscritas en laboratorios oficiales acreditados por el MINVU.
- Informes de ensayo que establecen la Clasificación de Resistencia al Fuego de un sistema o elemento constructivo.
- Estudios de asimilación, definidos en el artículo 4.3.2 de la OGUC, donde se estipula que: *“Si al solicitarse la recepción definitiva de una edificación, alguno de los elementos, materiales o componentes utilizados en ésta no figuran en el Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción y no cuentan con certificación oficial conforme a este artículo, se deberá presentar una certificación de un profesional especialista, asimilando el elemento, material o componente propuesto a alguno de los tipos que indica el artículo 4.3.3 de este mismo Capítulo y adjuntar la certificación de éstos en el país de origen”.*

Una primera observación de la información abordada en este capítulo permite considerar que, **la madera presenta un comportamiento combustible completamente contrario al del hormigón, lo que corresponde a una de sus principales desventajas en cuanto a su resistencia al fuego**, ya que el hormigón no presenta mayores inconvenientes en este ámbito. Sin embargo, para la madera, pese a que su desempeño se ve afectado por la combustibilidad, experimenta un proceso de carbonización que le permite cumplir con las normas establecidas, siempre y cuando se considere un correcto dimensionamiento. *Este punto es planteado en detalle en próximos capítulos.*

# Capítulo 5

## Procesos constructivos en madera y hormigón prefabricado

### 5.1. Método constructivo en materiales prefabricados

La secuencia constructiva de estructuras con miembros estructurales prefabricados se esquematiza en la Figura 5.1. Se debe tener en cuenta que las diferencias de material en el que se trabaja influyen en cada etapa, tales como en la fabricación, montajes y el tipo de conexiones, así como también, en los equipos y grúas que se utilizan en el proceso.

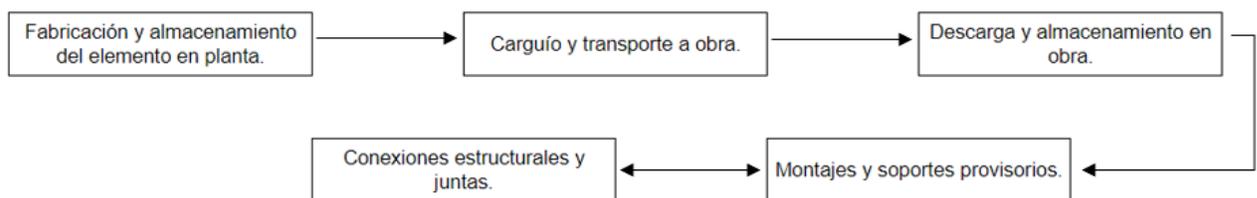


Figura 5.1: Secuencia constructiva de elementos prefabricados.

Fuente: Elaboración propia.

Cada etapa del proceso resulta esencial para obtener un buen resultado, por lo que se deben tener en cuenta una serie de requerimientos y buenas prácticas, entre las cuales se menciona: realizar una buena planificación de la secuencia de montajes e izaje, además de la planificación de los soportes temporales, y la prevención en las conexiones y juntas.

#### 5.1.1. Fabricación de los elementos

##### Madera

E2E toma la arquitectura del cliente y realiza propuestas adaptando el proyecto al sistema constructivo detallando instalaciones, pasadas, revestimientos, para finalmente realizar un modelo BIM. De este modelo se obtienen los planos, archivos e instructivos de montaje para construir de mejor manera. Así, con toda esa información, comienza el proceso en planta donde la procesadora de vigas dimensiona de manera automatizada cada elemento a través de la máquina de control numérico computacional.

Una vez cada elemento de madera está completamente dimensionado (e impregnado previamente) se procede al ensamblaje en la línea automática. Primeramente, se arma la estructura de los paneles de entramado ligero con pie derechos y soleras (sistema marco plataforma), para luego instalar las placas estructurales (OSB o Plywood) en ambos costados. Finalmente se realizan las instalaciones eléctricas e hidráulicas y se coloca la aislación térmica y demás componentes de los paneles. Adicional a la lana de vidrio se utilizan cintas para sellar de manera impermeable elementos, membranas hidrofugas para mantener la estructura seca y expulsar la humedad y cintas de espuma para aislación entre elementos (encuentro entre paneles o ventanas). Los paneles están compuestos siguiendo las capas de la Figura 5.2.

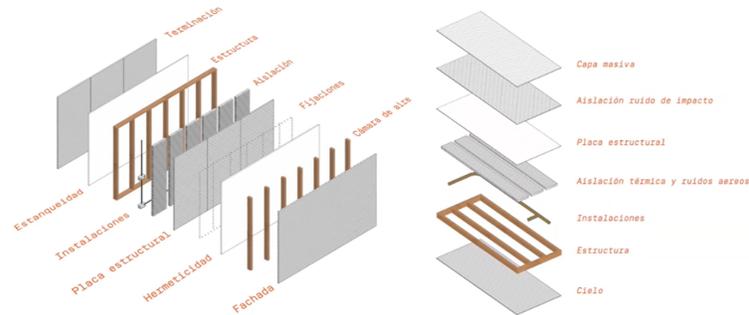


Figura 5.2: Composición de muros (izquierda) y piso de entrepisos (derecha). Fuente: E2E.

Una vez los paneles están listos se van a la zona de magazine donde se instalan los revestimientos de los paneles además de puertas, ventanas y cualquier otro requerimiento del cliente. Con esto son apartados a la zona de despacho.

En la Figura 5.3 se ilustra la fabricación de elementos de madera.



Figura 5.3: Fabricación de elementos prefabricados de madera. Fuente: E2E.

## Hormigón

Antes de comenzar con la fabricación de los elementos se requiere la información sobre sus dimensiones, centro de gravedad, peso y volumen del hormigón, ubicación del acero de refuerzo, localización de elementos empotrados como conductos y/o aperturas, detalles de unión y conexión entre elementos, entre otros.

Una vez establecidos los planos en taller, comienza el proceso con el ensamblado del molde según las dimensiones del elemento, verificando la horizontalidad y verticalidad de su base. Luego, se prepara y limpia el moldaje y se retiran todos los escombros, morteros o barras de nivelación. Con esto, se procede a colocar aceite o un agente desmoldante en todas las superficies y se verifica que todas las juntas, bordes, pernos, anclajes, puntales y sellos de goma estén debidamente asegurados.

Posteriormente, se fija adecuadamente el acero de refuerzo, recesos, insertos, ganchos de izaje y elementos embebidos verificando que su posición y dimensiones estén de acuerdo con los planos. De ser necesario puede usarse soldadura de punto para asegurar los elementos. Debe disponerse de suficientes espaciadores con las dimensiones correctas, posicionados y asegurados para que no se muevan durante el vaciado. Con esto, se inspecciona todo el moldaje y se realiza el ensayo de cono de Abraham antes del vaciado para verificar que el hormigón se puede utilizar.

Luego, se vacía el hormigón verificando que su grado sea el especificado. Con esto, se realiza el vibrado y la compactación especialmente en áreas congestionadas, para después, nivelar o extender el hormigón hasta alisar la superficie. Posterior a esto, se realiza el curado y finalmente el desmoldaje, inspeccionando que no existan imperfecciones en la superficie de la pieza.

Por último, se identifican las piezas para su posterior traslado cuando hayan alcanzado el 75 % de su resistencia.

En la Figura 5.4 se ilustra la fabricación de elementos de hormigón prefabricado.



Figura 5.4: Fabricación de elementos prefabricados de hormigón.

Fuente: CONQUAS 21.

## 5.1.2. Secuencia constructiva

A continuación, se detallan las etapas trabajando con elementos prefabricados:

**Paso 1:** Una vez que las piezas prefabricadas son producidas en la fábrica, son trasladadas a la obra donde se descarga, y almacenan adecuadamente (sitio plano, recto, rígido, seco y limpio), proveyendo soportes temporales tomando en cuenta la accesibilidad para el posterior montaje (organizándolos según el cronograma de utilización).

**Paso 2:** Se identifican las piezas, se hace inspección visual en busca de grietas o imperfecciones y se verifican las dimensiones. Además, se localizan los puntos de izaje y se verifican los requisitos de traslado de piezas, es decir, peso máximo de grúa y número de apoyos a utilizar para trasladar la pieza.

**Paso 3:** Una vez realizada la verificación, se utilizan grúas para realizar el montaje siguiendo secuencias de ensamblaje siempre considerando los detalles de las conexiones y las tolerancias para el ensamblaje.

En la Figuras 5.6 y 5.5 se pueden observar estos primeros pasos.

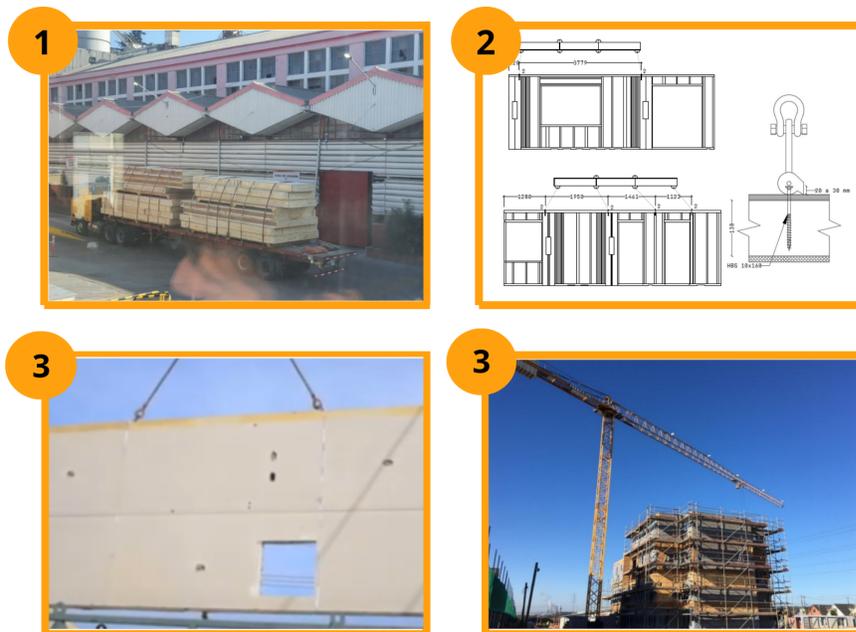


Figura 5.5: Primeros pasos de la secuencia constructiva de elementos prefabricados de madera.

Fuente: E2E.

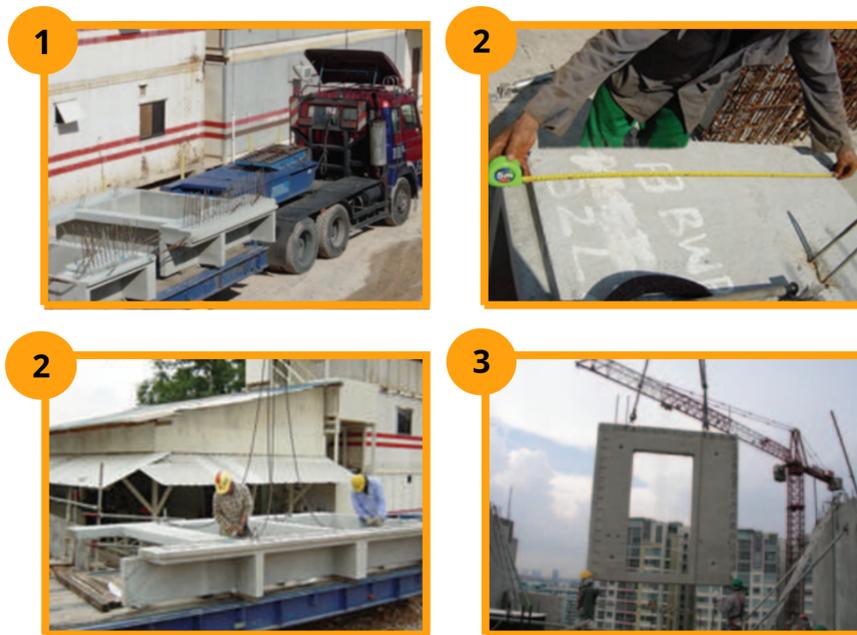


Figura 5.6: Primeros pasos de la secuencia constructiva de elementos prefabricados de hormigón. Fuente: CONQUAS 21.

## Madera

### Paso 4 y 5 - Instalación de los paneles verticales (muros) y horizontales (entrepisos):

Tras el izaje y el posicionamiento de los paneles hasta la ubicación designada, se procede a la fijación entre elementos la cual debe hacerse manteniendo el aplomado.

La fijación puede ser con tornillos tirafondo o de hilo completo. La diferencia entre estas se debe a que el tornillo tirafondo, por la configuración del hilo, presiona una madera contra la otra y su cabeza trabaja, en cambio, en el tornillo de hilo completo, su cabeza no trabaja.

Para la fijación de las soleras al hormigón se utilizan tornillos de anclajes. Por su parte, los herrajes metálicos se unen a la madera mediante pasadores autoperforantes.

Las fijaciones de placas se realizan mediante clavos (6d o 8d) separados según los requerimientos de resistencia y número de placas a unir. También suelen usarse grapas para unir placas no estructurales las cuales cuentan con un adhesivo que se activa con el calor de la pistola neumática.

Por otra parte, las conexiones son parte fundamental del proceso, estas pueden ser tradicionales, sin embargo, dado que se trata de construcción industrializada donde los paneles llegan completos a terreno, se realizan modificaciones como el añadir presoleras para mejorar la constructibilidad, lo que influye en las conexiones.

Conexión muro-fundación: Se realizan mediante una presolera, fijada a la fundación con pernos Titen. La presolera a su vez es fijada al muro clavando el OSB a ésta, respetando el patrón de clavado indicado por el calculista. Todas las presoleras deben ir protegidas con membrana hidrófuga tipo Cedral o similar entre la madera y el hormigón.

Conexión entre muros: Todos los muros son conectados entre sí mediante tornillos HBS, VGS o equivalente aprobado por cálculo. El largo es indicado considerando la geometría de la conexión, y la cantidad es indicada según el proyecto de cálculo. En los encuentros debe agregarse adhesivo de montaje en cordones de 5mm.

Conexiones muro-techo / muro-entrepiso: Las conexiones entre muros inferiores y entrepiso se realizan con tornillos HBS, VGS o similar, según proyecto de cálculo.

Conexiones entre techos / entrepisos: Los entrepisos pueden ser conectados mediante flejes de acero/aluminio, utilizando elementos auxiliares como presoleras, o con las mismas placas de OSB entre sí. De igual forma, puede especificarse una conexión atornillada entre paneles, si así se requiere.

En la Figura 5.7 se puede observar la instalación de paneles de madera.

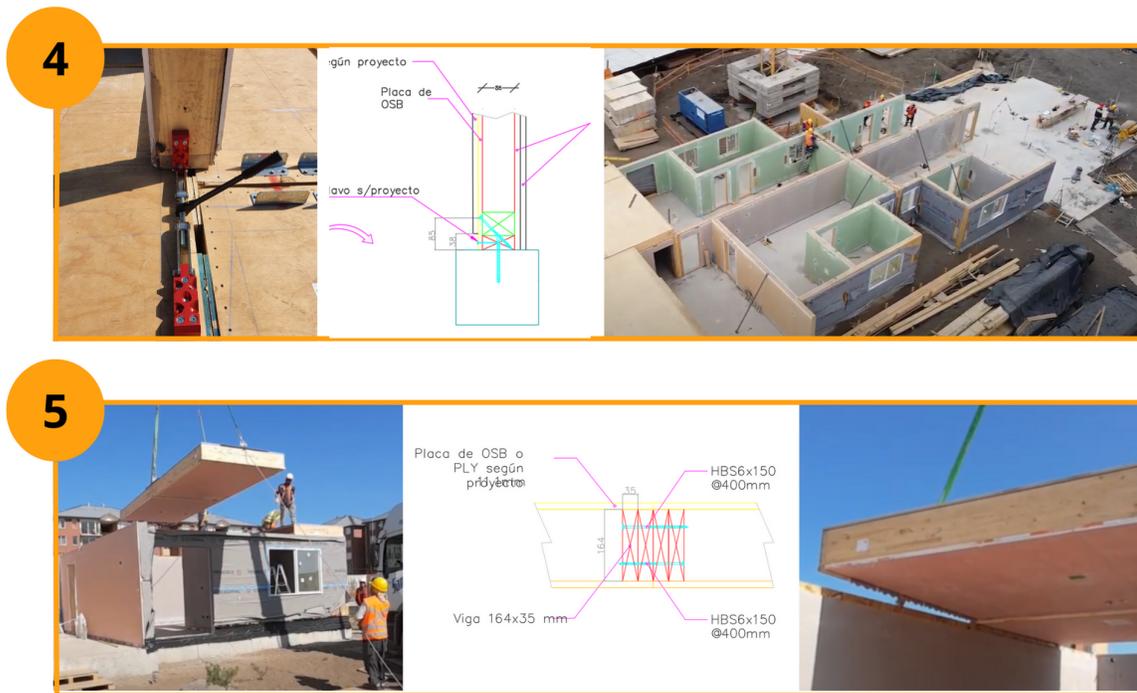


Figura 5.7: Instalación de paneles verticales(4) y horizontales(5) de madera.

Fuente: E2E.

## Hormigón

### **Paso 4 - Instalación de los paneles verticales o muros:**

Para comenzar, se trazan líneas de referencia para determinar la posición de instalación y se colocan niveladores en espera del grouting y Aislapol de ser necesario.

Posteriormente, se izan los paneles hasta la ubicación designada usando grúas con cables, para luego ajustar manualmente la posición y asegurarla con puntales verificando el alineamiento vertical del panel y el espesor de la junta horizontal inferior.

Se aplica grouting preparado según las especificaciones del fabricante para sellar la parte inferior de los muros y en conexiones de tuberías si existen dejando que fragüe al menos 24 horas y tomando muestras para ser testeadas posteriormente.

Luego de verificar que las juntas horizontales están selladas debidamente se realizan las juntas verticales colocando el acero de refuerzo especificado en el diseño y los moldajes para el posterior vaciado de hormigón asegurados a través de puntales para evitar corrimientos.

Finalmente se desmoldan las juntas luego de que la debida resistencia se haya alcanzado y en casos especiales donde se dejen dilataciones se instalaran los elementos de Aislapol o en su defecto sellantes.

### **Paso 5 - Instalación de los elementos horizontales (Vigas y Losas):**

En primer lugar, se trazan líneas de referencia para determinar el alineamiento y nivel requerido por el elemento verificando que los aceros de refuerzo estén alineados.

Poner puntales/soportes temporales a las vigas y/o losas.

Se izan los elementos con las grúas mediante cables. Los elementos deben ser soportados en al menos dos puntos hasta ser ubicados en su posición final, verificando su buena alineación previo a la implementación de juntas.

Para componentes con juntas realizadas en obra se deben colocar y traslapar las armaduras según lo indicado en los planos.

Poner los moldajes, asegurándolos apropiadamente, para proceder al vaciado de las juntas.

Finalmente se remueven los moldajes y soportes, una vez que el hormigón haya alcanzado su resistencia mínima.

En la Figura 5.8 se pueden observar los pasos 4 y 5 en elementos de hormigón.



Figura 5.8: Instalación de paneles verticales(4) y horizontales(5) de hormigón.  
Fuente: CONQUAS 21.

## 5.2. Cronograma

### 5.2.1. Edificaciones en madera

El análisis de los tiempos de ejecución en madera se realiza considerando un informe facilitado y realizado por el CIM UC, llamado “Análisis de Costos de viviendas para edificación en madera en dos tipologías de 5 pisos en la Zona Central”, en este informe se analizan 2 tipos de edificios de 5 pisos, con características y tiempos de construcción en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Tiempos referenciales de construcción en edificaciones de 5 pisos. Fuente: Informe CIM UC

	Sup. planta [m <sup>2</sup> ]	Sup total [m <sup>2</sup> ]	Panelizado vertical [m <sup>2</sup> ]	Tiempo total construcción [días]
Vivienda A vulnerable	266	1332	1866	110
Vivienda B emergente	437	2183	2514	135

Adicionalmente, para la velocidad de montaje de paneles horizontales y verticales, se consideran las estimaciones internas de la empresa E2E, que corresponde a un promedio de entre 30 y 40 paneles diarios, cada panel es de entre 10 y 15[m<sup>2</sup>] aproximadamente. Esto quiere decir que la velocidad de montaje puede variar de 300 a 600[m<sup>2</sup>]/día, para ser rigurosos se considera **300 m<sup>2</sup> de panel diarios**, sin embargo, existen otras actividades involucradas en el proceso, como lo es instalar las presoleras, mantener el aplomado de los muros, fijar y conectar los elementos estructurales, que se traduce en un 50 % de tiempo extra. Con esto se obtiene un tiempo estimado de montaje presente en la Tabla 5.2, el cuál considera tanto para paneles horizontales como verticales. Por otra parte, esta velocidad de montaje es mayor a la estimada según los datos recopilados en la Tabla 5.1, la cual corresponde a 174[m<sup>2</sup> de panel/día] y por ende 15 días en montaje.

Tabla 5.2: Estimación de tiempo de montaje de paneles en el edificio en estudio. Fuente: Elaboración propia

	Sup. panelizado por piso [m <sup>2</sup> ]	Tiempo montaje por piso [días]	Tiempo total por piso [días]	Tiempo total 4 pisos [días]
Paneles	525	1.75	3	12

Para realizar el cronograma, se estipula que: una vez realizado el 50 % del trabajo de instalación de faenas, se da comienzo a la Obra Gruesa. Por otra parte, las fundaciones comienzan una vez alcanzado el 25 % de avance de la etapa de excavación y relleno. Con esto, la etapa de montaje de elementos horizontales comienza poco después del montaje de los paneles verticales, para luego realizarse simultáneamente y dar paso a los entrepisos. Así, la última etapa en comenzar corresponde a las instalaciones de agua y electricidad.

Finalmente, se obtiene un plazo total de construcción de 96 días laborables con jornadas de 8 horas de trabajo, lo que correspondería a 5 meses corridos. Gran parte de la duración de estos trabajos está destinada a las partidas de Excavación y relleno, Fundaciones y radier, ocupando más de 30 días hábiles lo que representa casi un tercio del plazo total del proyecto. Como se puede observar en detalle en la Figura 5.9.

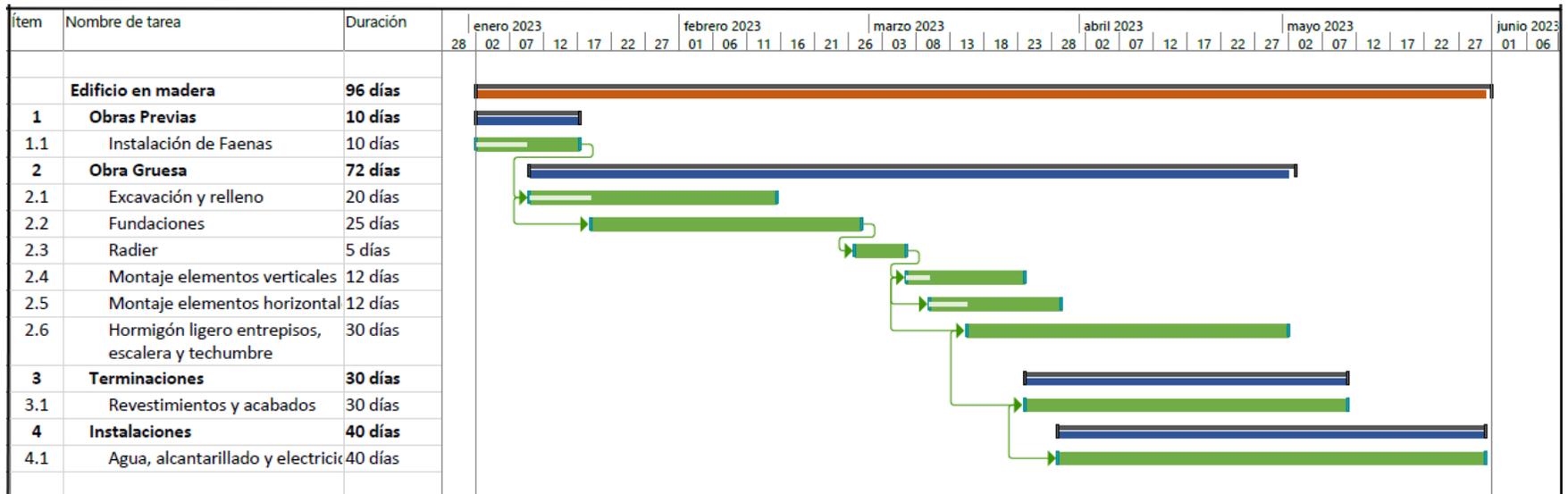


Figura 5.9: Cronograma edificación en madera de 4 pisos. Fuente: Elaboración propia.

## 5.2.2. Edificaciones en hormigón prefabricado

Para comenzar el análisis de los tiempos de ejecución en hormigón prefabricado, se realizan unas breves consultas a expertos en el tema, con lo que se obtiene la información presente en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Estimación preliminar. Fuente: David Campusano.

	Tiempo [días]
Etapas previas: faenas, trazado, excavaciones, fundaciones y radier	75
Velocidad de montaje (1 piso/semana)	28
<b>Total estimación</b>	<b>103</b>

Luego, para obtener datos más concretos sobre la velocidad de montaje de los paneles prefabricados, se considera una investigación que estudia los elementos prefabricados de hormigón, en especial los construidos por la empresa Tensocret[9]. En este se señalan algunos tiempos promedio estimados, como los que se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Velocidad montaje (con cuadrilla de 4 personas)[9].

	Velocidad de montaje	
Losas	19	[m <sup>2</sup> /h]
Paneles de muros	37	[m <sup>2</sup> /día]

Con esto se obtiene un tiempo estimado para el montaje de los 4 pisos, presente en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Estimación tiempo de montaje en el edificio en estudio.  
Fuente: Elaboración propia

	Sección total [m <sup>2</sup> ]	Tiempo total [días]
Losas	880	6
Muros	756	20

Para realizar el cronograma se considera que el tiempo total de montaje, abarcando losas y paneles de muros, es de 26 días, a los cuales se les suman un tiempo extra del 10 % dedicado particularmente a las conexiones húmedas, teniendo 29 días en total. Adicionalmente, se estipula que una vez avanzado trabajo de instalación de faenas, se da comienzo al trazado y terrazo, con lo que ambas etapas finalizan simultáneamente. Con esto, comienzan las siguientes etapas, de manera a similar a la obra en madera.

Finalmente, se obtiene un plazo total de construcción de 120 días laborables con jornadas de 8 horas de trabajo, lo que correspondería a 6.2 meses corridos. Al igual que en el caso de la madera, gran parte de la duración de estos trabajos está destinada a las partidas de Excavación y relleno, Fundaciones y radier, ocupando más de 40 días hábiles lo que representa casi un tercio del plazo total del proyecto. Se pueden observar los tiempos estipulados de cada partida, en detalle, en la Figura 5.10.

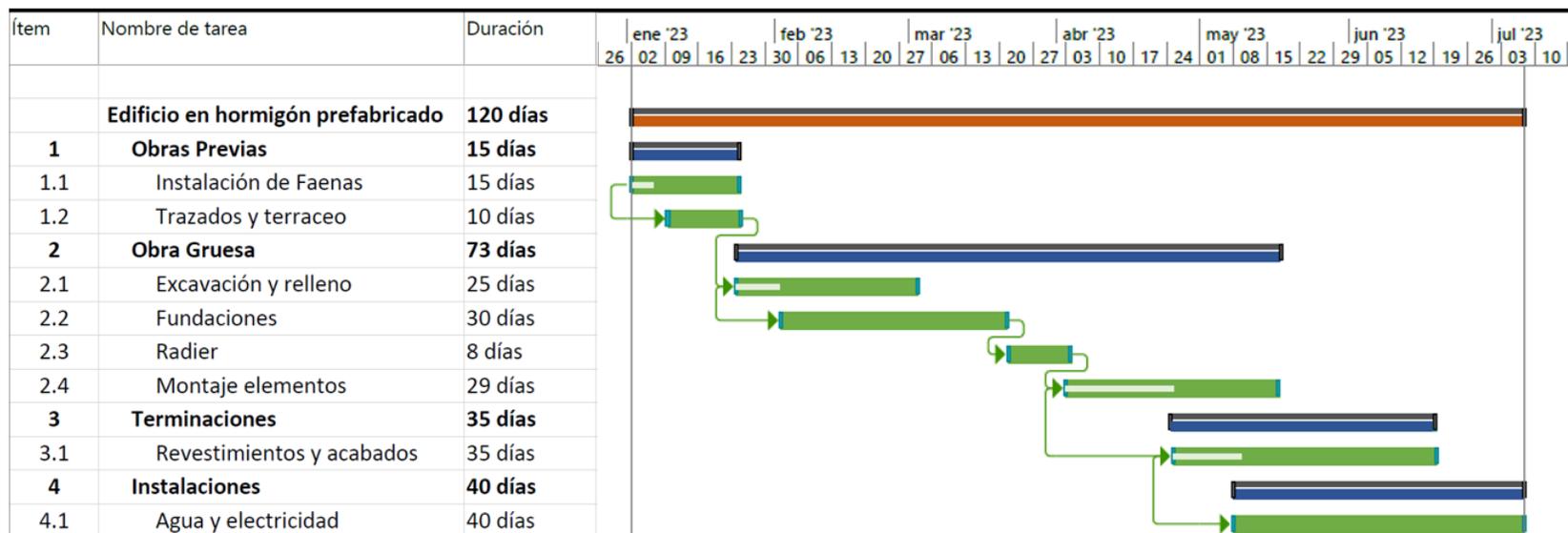


Figura 5.10: Cronograma edificación en hormigón prefabricado de 4 pisos. Fuente: Elaboración propia.

## 5.3. Costos

Para ambos materiales se consideran únicamente los costos directos asociados a la obra, abarcando sus 4 principales actividades: obras previas, obra gruesa, instalaciones y terminaciones.

### 5.3.1. Edificaciones en madera

El Costo Directo estimado para la edificación en madera alcanza un monto aproximado a 10.500 UF, y considera sus mayores costos para las partidas de Obra Gruesa e Instalaciones, con un porcentaje del 71 y 26 % del costo total, respectivamente. El desglose de los costos se puede observar en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Costo Directo para madera. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (UF)	Precio Total (UF)	% CD
<b>1</b>	<b>OBRAS PREVIAS</b>				<b>250</b>	<b>2,32 %</b>
1.1	Instalación de faenas	gl	1	250	250	
<b>2</b>	<b>OBRA GRUESA</b>				<b>7.678</b>	<b>71,37 %</b>
<b>2.1</b>	<b>Excavación y relleno</b>	<b>m3</b>	<b>184</b>	<b>0,15</b>	<b>28</b>	
<b>2.2</b>	<b>Fundaciones</b>				<b>1057</b>	
2.2.1	Hormigón de Fundaciones	m3	87	4,3677	380	
2.2.2	Armaduras de Fundaciones	kg	14.213	0,0476	677	
<b>2.3</b>	<b>Radier</b>				<b>99</b>	
2.3.1	Radier	m2	220	0,45	99	
<b>2.4</b>	<b>Paneles verticales</b>				<b>3.190</b>	
2.4.1	Paneles de Muros	m2	908	3	3.086	
2.4.2	Transporte	gl	1	104	104	
<b>2.5</b>	<b>Paneles horizontales</b>				<b>3.096</b>	
2.5.1	Paneles	m2	880	3	2.992	
2.5.2	Transporte	gl	1	104	104	
<b>2.6</b>	<b>Entrepisos, escalera y techumbre</b>				<b>209</b>	
2.6.1	Hormigón en entrepisos	m2	37	2,60	96	
2.6.2	Escalera	gl	1	43	43	
2.6.	Techumbre	m2	231	0,30	69	
<b>3</b>	<b>TERMINACIONES</b>				<b>136</b>	<b>1,26 %</b>
3.1	Revestimientos y acabados	m2	544	0,25	136	
<b>4</b>	<b>INSTALACIONES</b>				<b>2.694</b>	<b>25,04 %</b>
4.1	Agua y alcantarillado	gl	1	924	924	
4.2	Electricidad	gl	1	1.769,9	1.770	
	<b>TOTAL COSTO DIRECTO CONTRATO (UF)</b>				<b>10.758</b>	<b>100,00 %</b>

### 5.3.2. Edificaciones en hormigón prefabricado

El Costo Directo estimado para la edificación en hormigón prefabricado alcanza un monto aproximado a 11.300 UF, y considera sus mayores costos para las partidas de Obra Gruesa e Instalaciones, con un porcentaje del 75 y 21 % del costo total, respectivamente. El desglose de los costos se puede observar en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Costo Directo para hormigón prefabricado.

Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (UF)	Precio Total (UF)	% CD
<b>1</b>	<b>OBRAS PREVIAS</b>				<b>289</b>	<b>2,56 %</b>
1.1	Instalación de faenas	gl	1	279	279	
1.2	Trazado y terraceo	gl	1	10	10	
<b>2</b>	<b>OBRA GRUESA</b>				<b>8.424</b>	<b>74,71 %</b>
<b>2.1</b>	<b>Excavación y relleno</b>				<b>50</b>	
2.1.1	Excavaciones	m3	124	0,2120	26	
2.1.2	Rellenos	m3	37	0,6401	24	
<b>2.2</b>	<b>Fundaciones</b>				<b>1.522</b>	
2.2.1	Emplantillados	m3	5	3,2826	16	
2.2.2	Hormigón de Fundaciones	m3	118	4,3677	514	
2.2.3	Armaduras de Fundaciones	kg	19.232	0,0476	915	
2.2.4	Moldajes de Fundaciones	m2	126	0,6060	76	
<b>2.3</b>	<b>Radier</b>				<b>147</b>	
2.3.1	Radier Hormigón G25 de 12 cm	m2	220	0,6673	147	
<b>2.4</b>	<b>Paneles verticales</b>				<b>3.405</b>	
2.4.1	Paneles de Muros	m3	136	20	2.724	
2.4.2	Transporte y montaje	m3	136	5	681	
<b>2.5</b>	<b>Paneles horizontales</b>				<b>3.300</b>	
2.5.1	Paneles de Muros	m3	132	20	2.640	
2.5.2	Transporte y montaje	m3	132	5	660	
<b>3</b>	<b>TERMINACIONES</b>				<b>188</b>	<b>1,67 %</b>
3.1	Revestimientos y acabados	m2	626	0,3	188	
<b>4</b>	<b>INSTALACIONES</b>				<b>2.375</b>	<b>21,06 %</b>
4.1	Agua y alcantarillado	gl	1	956	956	
4.2	Electricidad	gl	1	1.419	1.419	
<b>TOTAL COSTO DIRECTO CONTRATO (UF)</b>					<b>11.275</b>	<b>100,00 %</b>

Una primera observación de la información abordada en este capítulo permite considerar que, **la madera es altamente competitiva en tiempos y costos en comparación con el hormigón prefabricado**, y que, ambos al ser industrializados presentan ventajas sobre el método tradicional. *Este punto es detallado en próximos capítulos.*

# Capítulo 6

## Análisis comparativo

### 6.1. Durabilidad y resistencia estructural

Por una parte, para analizar la **resistencia estructural** se consideran dos aspectos principalmente: el análisis sísmico y la verificación de diseño.

Primeramente, para realizar una comparación en el análisis sísmico, se considera el modelo rígido en ambas materialidades, con esto los drift de entrepiso en el centro de masa (CM) y en otro punto (OP), son indicados en la Figura 6.1, donde se presenta adicionalmente el límite normativo de la NCh433.

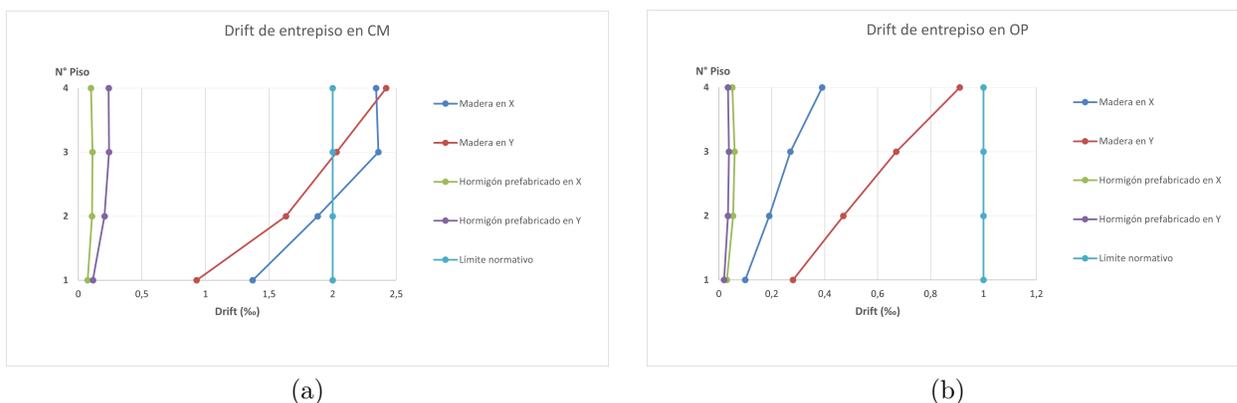


Figura 6.1: Drift de entrepiso en centro de masa (a) y en otro punto (b).

Para este punto, una propiedad fundamental es la resiliencia de los materiales, es decir, la capacidad que poseen de recuperar su forma después de sufrir una deformación, especialmente ante cargas cíclicas, como lo son los sismos.

Como se puede observar, solo existe un incumplimiento en los drift de entrepiso (medidos desde el centro de masa) de los pisos 3 y 4 de la edificación de madera. Ante esto, se indica que para esta estructura y dada las limitaciones en cuanto a la longitud posible de muros, no es posible reducir más el nivel obtenido para el drift de entrepiso. Cabe destacar que se debe a que la normativa chilena sobre el diseño sísmico de estructuras está ideada principalmente para las estructuras de hormigón armado y no de madera, sin embargo, teniendo en cuenta deformaciones límites de normas internacionales para estructuras de madera se puede decir que la estructura alcanza deformaciones aceptables (MdC-HdP).

Por otra parte, para la verificación de los elementos de diseño de cada estructura, se consideran sus elementos comparables, como lo son los muros y las vigas. Para ambos casos, se consideran los elementos que controlan el diseño, es decir, aquellos de mayor demanda.

Los muros de madera están compuestos por solera superior, solera inferior, pie derecho interior, pie derecho de borde, sistema ATS y placa OSB, en cambio los de hormigón prefabricado están compuestos solo por hormigón y armadura de refuerzo.

Es por esto que, en la Figura 6.2 se muestra el factor de utilización (FU), es decir, la relación entre demanda y sollicitación, según cargas a corte, momento, compresión y/o flexo-compresión de alguno de los elementos mencionados.

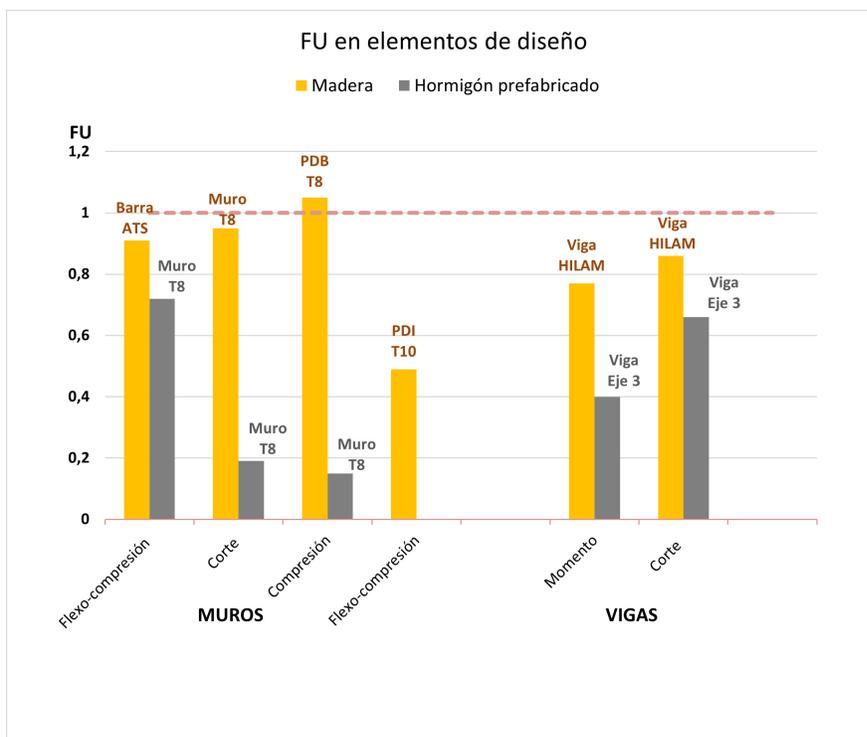


Figura 6.2: Factor de utilización de los elementos de diseño.

Como se puede observar en la gráfica, los materiales están diseñados de manera correcta (es decir,  $FU < 1$ ), a excepción de ciertos PDB de la madera en el piso 2, los cuáles sobrepasan levemente el  $FU = 1$ , dado que para estos casos no se presentan comentarios, se puede considerar que el sistema marco-plataforma actúa como un sistema estructural completo y no como elementos individuales, por lo que esto no presenta una limitación para el diseño. Además, la NCh1198 dedicada al cálculo de construcciones en madera se encuentra en proceso de revisión, y tomará metodologías específicas para el cálculo en marco plataforma.

Cabe destacar que, para el caso del hormigón prefabricado, el diseño escogido considera la menor sección posible de hormigón, que corresponde a muros ordinarios de 15cm (cuasi-equivalente al espesor de muros de marco-plataforma) con la cuantía mínima posible de refuerzo. Esto con el fin de considerar que ambas estructuras presentan un diseño eficiente.

Para analizar la **durabilidad** del material se presenta la Tabla 6.1 donde se mencionan los aspectos relevantes de cada material. Cabe señalar que existen diversos factores determinantes que influyen en la durabilidad una estructura, tales como el diseño estructural, la calidad de los materiales, el proceso constructivo que se lleve a cabo, además de la protección contemplada.

Tabla 6.1: Tabla recapitulativa sobre la durabilidad de los materiales.

Madera	Hormigón Prefabricado
<b>¿Qué se considera como durabilidad?</b>	
Capacidad de la estructura a soportar durante su vida útil las diferentes condiciones físicas y/o químicas a las que se verá expuesta.	
<b>Vida útil según material (SII 2018)</b>	
30 años	80 a 50años
Vida útil para edificaciones comunes: 50 años	
<b>Ejemplos en Chile:</b>	
<p><b>Iglesias de Chiloé</b>, ubicadas en la Región de Los Lagos, las cuales fueron construidas a partir del siglo XVII, y 16 de estas fueron inscritas en la Lista del Patrimonio Mundial en el año 2000.</p> <p><b>Campamento minero Sewell</b>, ubicado en la región de O'Higgins. Su construcción inició en el año 1905 e implicó distintas etapas, llegando a su máximo desarrollo en el año 1966.</p>	<p><b>Edificios KPD</b>, ubicados en diversas localidades de Viña del mar, Quilpué y Santiago, los cuales comenzaron en 1971 y contemplaban muros prefabricados de hormigón armado.</p> <p><b>Edificio Chacay</b>, ubicado en Temuco, estructurado en base a pórticos compuestos por elementos prefabricados, como columnas, vigas y losas. Tiene una altura de 5 pisos y fue realizado en 2012.</p>
<b>¿Cómo asegurar la durabilidad?</b>	
<p>Por lo general, se consideran <b>tratamientos preventivos</b> para asegurar su durabilidad, como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de especies madereras durables</li> <li>• Uso de productos preservantes contra los efectos de una exposición directa a la intemperie.</li> <li>• Protección química de la madera.</li> <li>• Control de la humedad durante el transporte, el almacenado, el ensamblaje y la construcción.</li> </ul>	<p>Por lo general, se consideran <b>reparaciones</b> para asegurar su durabilidad, como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inyección de grietas (grouting, mortero, u otros) para recuperar el monolitismo.</li> <li>• Reparaciones superficiales, manuales o con mortero proyectado, aplicadas a fallas de espesores reducidos.</li> <li>• Reemplazo de hormigón.</li> <li>• Colocación de armaduras adicionales, anclajes con epoxi, y refuerzos externos.</li> </ul>
<b>Ventajas:</b>	
<p>Posee una gran ductilidad, lo que mejora su durabilidad ante cargas cíclicas, además de su capacidad de absorber energía, es decir, es un material resiliente.</p> <p>Posee una adaptabilidad natural ante cambios climáticos y es naturalmente resistente ante condiciones ambientales (con adecuada protección).</p>	<p>La adaptabilidad en su forma permite conseguir resistencias elevadas en cualquier requerimiento, por lo que es un material seguro.</p> <p>Considera una poca o baja necesidad de mantenimiento.</p>
Ambos materiales con un cuidado adecuado, correcto diseño y construcción, pueden llegar a tener una vida útil de varios años.	
<b>Desventajas:</b>	
<p>Posible desarrollo de hongos xilófagos debido a ciertas condiciones de humedad; los cambios de humedad impactan en su resistencia; requiere mantenimiento constante.</p>	<p>Debido a algunos agentes abiológicos existe la posibilidad de corrosión de la armadura (por carbonatación o presencia de cloruros).</p>
<b>Algunos agentes nocivos:</b>	
<p><b>Agentes biológicos:</b> hongos de pudrición, larvas y termitas.</p> <p><b>Agentes abiológicos:</b> exposición a la intemperie y ambientes con agentes químicos.</p>	<p><b>Ataques físicos:</b> erosión (por abrasión o cavitación) y acción de hielo/deshielo.</p> <p><b>Ataques químicos:</b> por ácidos, sulfatos y reacción de los álcalis.</p>

## 6.2. Resistencia al fuego

Para analizar la **resistencia al fuego** de cada material se presenta la Tabla 6.2 donde se mencionan los aspectos esenciales de cada material. En esta, se recapitulan las características propias de cada material, las que permiten comprender sus comportamientos. Además, se mencionan algunos de los aspectos positivos y negativos que presentan, en conjunto a ciertas soluciones ofrecidas en el Listado Oficial de Comportamiento al Fuego (MINVU-2014), con el fin de mostrar estructuras que tienen equivalencia en clasificación.

Tabla 6.2: Tabla recapitulativa de resistencia al fuego (RF)

Madera (MLE)	Hormigón Prefabricado	
	Hormigón	Acero
<b>Caracterización del material</b>		
<b>Combustibilidad</b>		
Alta	Nula	Nula
<b>Conductividad</b>		
Baja	Baja	Muy alta
<b>Contribución a la carga del fuego</b>		
Alta	Nula	Nula
<b>Solución constructiva</b>		
<b>Aspectos positivos</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La madera maciza presenta una resistencia al fuego inherente a través del aislamiento de sus capas internas, debido a la carbonización y su velocidad predecible/estimada, lo que ralentiza la combustión y la propagación del fuego.</li> <li>• Por esta misma razón, pese a ser un material combustible, su correcto diseño es capaz de propiciar la seguridad que estipula la norma.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La continuidad del hormigón es absoluta y asegura, permanentemente, un buen comportamiento de la estructura frente al fuego.</li> <li>• Al ser un material genérico tiene características estándar por lo que generalmente no es necesario realizar informes o estudios adicionales de su RF.</li> <li>• El hormigón no desprende ningún tipo de humo, gases o vapores tóxicos al verse afectado por el fuego.</li> </ul>	
<b>Aspectos negativos</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Al estar constituido por diversas capas, se complejiza el estudio de RF, ya que se deben realizar ensayos o informes frente a cualquier cambio en la solución propuesta.</li> <li>• En ocasiones, se deben considerar métodos adicionales para mejorar la RF, como: añadir una sección sacrificial de madera, sobredimensionando los elementos; o incorporando productos retardantes mediante diversos tratamientos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El hormigón ofrece una protección intrínseca frente al fuego a diferencia del acero, por lo que se debe velar por un buen recubrimiento. Pese a esto, no se consideran aspectos negativos para el hormigón.</li> </ul>	
<b>Equivalencias en soluciones, según listado oficial OGUC</b>		
<b>Muros– paramentos– paneles verticales (Clasificación F-90)</b>		
Paneles de Madera Macizos, cuyas piezas se encuentran unidas entre sí por machihembrados, lengüetas o adhesivos. Espesor mínimo del elemento: 140mm	Muro de Hormigón (armado y sin armadura) Dimensiones: 100mm	
<b>Elemento de construcción destinado a uso como muro divisorio o perimetral en edificios (Clasificación F-150)</b>		
Nombre: Tabique Eraclit 50 mm Características: Listones de pino radiata con 5 pies derechos, 4 cadenetas, una solera inferior y otra superior. Espesor total del elemento: 0.21m	Nombre: Muro Bepolita H.L.70mm Características: Placa de hormigón de 70mm con una doble armadura de acero. Espesor total del elemento: 0.1m	
<b>Elementos estructurales horizontales (Clasificación F-60)</b>		
Nombre: Entrepiso Madera FDI CORFO-Fundación Chile Características: Formado por dos estructuras de pino radiata, separadas entre sí por medio de listones de 42 x 90 mm. Forrada con yeso-cartón en una cara y con tablero contrachapado en la otra; Espesor total: 0.357m.	Nombre: Losa de Hormigón Armado Espesor 12cm. Características: Hormigón grado H-25 de 120 mm de espesor con enfierradura de diámetro 8mm. El recubrimiento de la armadura tanto por la cara expuesta como por la cara no expuesta al fuego es de 15 mm.	

### 6.3. Procesos constructivos

Respecto a los **procesos constructivos** de cada material, se puede considerar que ambos, al tratarse de materiales prefabricados, siguen la misma secuencia constructiva que consiste en previa fabricación de los elementos en planta, bajo un sistema controlado, con posterior traslado a la obra donde se realiza el montaje e instalación según lo previamente estipulado, considerando las conexiones y juntas pertinentes. Es por esto que la evaluación de sus respectivas eficiencias constructivas se enfocará en los aspectos de: tiempos y costos de construcción.

Primeramente, para realizar una comparación en los tiempos de construcción, se presenta en la Figura 6.3 los **cronogramas de obra**, en conjunto a la variación que presenta la madera sobre el tiempo que estipula el hormigón prefabricado.

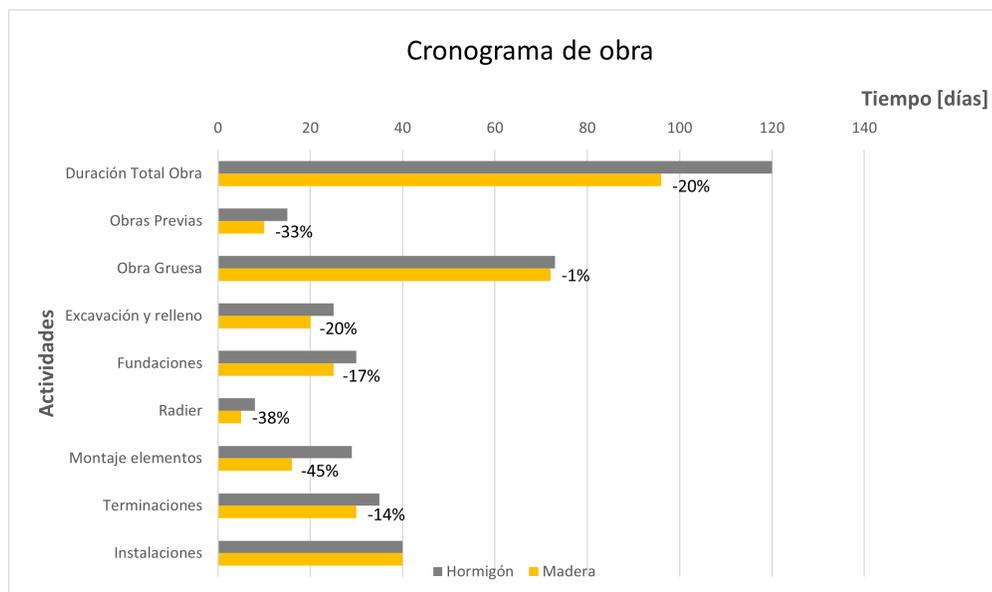


Figura 6.3: Comparación entre cronogramas de obras.

Como se puede observar en la gráfica, la madera presenta una ventaja en los tiempos constructivos de casi todas las partidas consideradas, a excepción de las instalaciones donde se prevé el mismo tiempo. Pese a que se observen altas diferencias en algunas partidas, como en montaje y obras previas, el cronograma total de construcción de la madera presenta solo un 20 % de ventaja por sobre el hormigón prefabricado, ya que existen diversas actividades que incrementan los tiempos de obra, como vaciar hormigón ligero de entrepisos, y posicionar las techumbres.

Por otra parte, una actividad que resulta interesante en comparar es el montaje de los elementos prefabricados, donde la madera tiene una ventaja del 45 % por sobre el tiempo del hormigón prefabricado. Esto puede deberse a que actualmente la tecnología utilizada por empresa de referencia (E2E) permite considerar una alta velocidad de montaje para los paneles de madera. Por su parte, se estima el tiempo de montaje del hormigón prefabricado a partir de una investigación que contempla el servicio de Tensocret, esta estimación puede incurrir en diferencias con la verdadera velocidad de montaje de esta empresa.

Por otra parte, para realizar una comparación en los costos de construcción, se presenta en la Figura 6.4.a los **costos directos de obra**, de las principales partidas: obras previas, obra gruesa, instalaciones y terminaciones, incluyendo el costo de los elementos prefabricados y del total de la obra. En conjunto a estos costos, se presenta la variación que presenta la madera sobre el costo que estipula el hormigón prefabricado. En la Figura 6.4.b un gráfico de distribución de los costos de obra directa según el promedio de ambas materialidades.

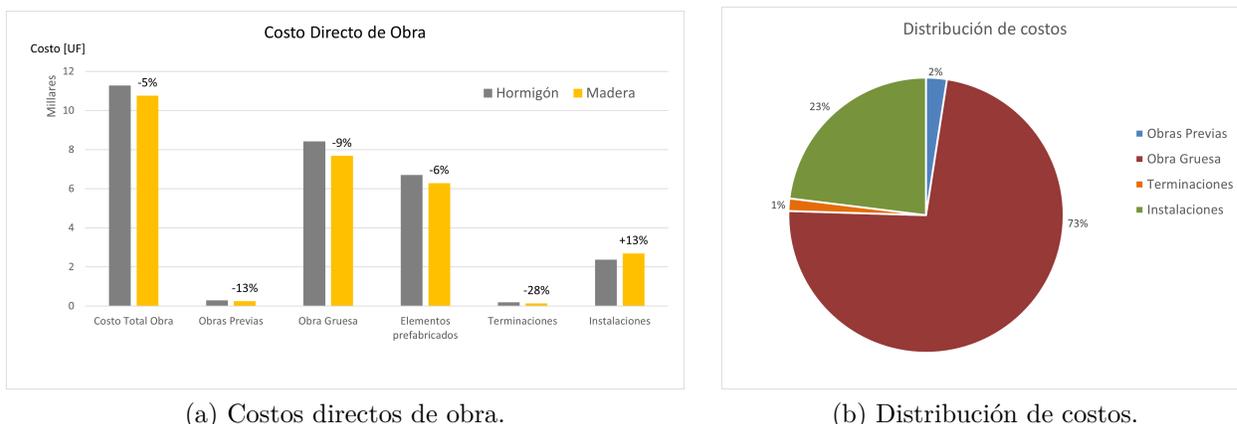


Figura 6.4: Costos directos de obra y distribución de costos.

Como se puede observar en la gráfica izquierda, la madera presenta una ventaja en el costo en casi todas las partidas, a excepción de las instalaciones, donde el costo en madera es un 13 % mayor al del hormigón prefabricado. La mayor diferencia porcentual se presenta en la partida de las terminaciones, alcanzando un 28 %, sin embargo, la diferencia más ventajosa para la madera se debe al 9 % de la obra gruesa, la que corresponde a 746 UF. La mayor parte de este valor se debe a la disminución del costo de los elementos prefabricados, donde se considera que la madera tiene un costo menor en 6 % (igual a 419 UF). Por el contrario, la menor diferencia entre costos ocurre en las partidas de obras previas y terminaciones, donde se tiene una diferencia de 39 y 52 UF, respectivamente. Con esto, al realizar una comparación total del costo directo de obra, se tiene la madera presenta un 5 % de ventaja por sobre el hormigón prefabricado, lo que equivale a 517 UF de diferencia.

Por otra parte, como se puede observar en la gráfica derecha, la distribución de costos que siguen las obras contempla los mayores gastos en la obra gruesa (con un 73 %) seguido por las instalaciones (con un 23%), y, por el contrario, los menores costos se incurren en las terminaciones y obras previas, con un 1 y 2 %, respectivamente. Adicionalmente, no se incluye en la gráfica, pero el costo propio a los elementos prefabricados corresponde a un 58 y 59 % del costo directo total en la madera y el hormigón prefabricado, respectivamente.

Particularmente para los costos, este trabajo no contempla un análisis de gastos generales, los que generalmente incluyen: sueldos y salarios, maquinas, herramientas y fletes, combustibles, gastos de operación, entre otros; tampoco se consideran imprevistos. Estos podrían variar las estimaciones globales realizadas.

Resulta relevante mencionar que tanto los cronogramas como los presupuestos de obra corresponden a estimaciones de otros presupuestos e investigaciones realizadas, las cuales provienen de diferentes autores y diferentes empresas. Esto implica que existan disimilitud entre algunas partidas pese a ser equivalentes, lo cual puede deberse a la diferencia de proveedores, contratistas, personal y maquinaria considerada, lo que altera el rendimiento de la obra.

## 6.4. Otros ámbitos a considerar

### Disponibilidad del material

Para comprender la disponibilidad de la MLE se considera un estudio de mercado realizado por el INFOR (2021), el cual entrega un análisis informado de la oferta y demanda de MLE y cerchas industrializadas de madera. De acuerdo a los catastros realizados por el INFOR, en los años 2020 y 2021, la producción de MLE llegó en el año 2020 a 22.092 m<sup>3</sup>, de los cuales el 15,3 % fue exportado, quedando en el mercado local una oferta de 18.723 m<sup>3</sup>, a lo que hay que agregar unos 50 m<sup>3</sup> importados, donde el 76 % de la producción de MLE es de madera de pino radiata, el 23 % de pino oregón y el 1 % de otras especies, y las cerchas industrializadas de madera se fabrican en un 100 % con pino radiata.

Adicionalmente, se menciona que la industria no ha logrado avanzar a niveles superiores de desarrollo principalmente por los problemas culturales asociados al uso de madera y sus productos en la construcción, lo que en definitiva se traduce en una baja demanda de MLE. Respecto al hormigón, vale mencionar que el cemento corresponde a su componente con mayor impacto en la cantidad total de energía necesaria y la contribución potencial al cambio climático debido a las emisiones de gases de efecto invernadero. [10] Su obtención puede provenir tanto de las industrias cementeras del país (como Melón S.A., Cemento Polpaico S.A. y Cbb), como también de importaciones (de Corea del Sur, China y Japón), al igual que el clinker, el cual corresponde a una materia prima clave en la producción del cemento (Briones, Oliva & Ramírez (2020)). A su vez, los hornos de clinker tienen el mayor impacto en la producción de cemento dada la descarbonatación de la caliza, que requiere grandes volúmenes de combustible, lo que emite CO<sub>2</sub>.

Además, un artículo que toma como caso estudio la planta productora Región del Bío Bío, en Chile, muestra a través de un ACV simplificado, que el proceso unitario con mayor impacto ambiental desde el punto de vista del consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>, está constituido por los transportes indirectos de las materias primas, principalmente áridos, que representan un 46 % del total del sistema estudiado. En particular, el transporte indirecto de gravilla y grava, los cuales corresponden a cerca del 59.5 % y 33.5 %, respectivamente, del consumo total del transporte indirecto, como se observa en la Figura 6.5. Con esto se puede considerar que existe una disponibilidad del material, por medio de canteras y yacimientos, sin embargo, los transportes dedicados al material afectan en gran parte a las emisiones de CO<sub>2</sub>.

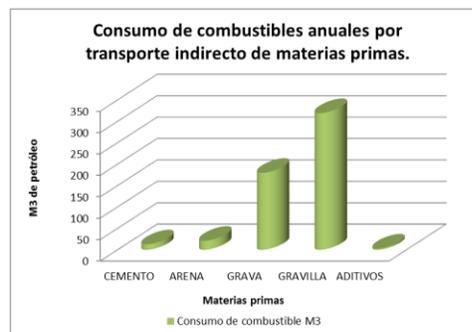


Figura 6.5: Consumo de combustibles en transporte de materias primas.

Fuente: Muñoz & Quiroz (2014).

## Confort térmico y eficiencia energética

El confort térmico que necesitan los habitantes de un hogar depende de diversos factores como: temperatura del aire, radiación de las superficies, humedad relativa y velocidad del movimiento del aire. La combinación correcta entre estas características crea las condiciones de confort humano. Sobre esto, se considera que, para lograr un confort térmico, la temperatura que se debe mantener al interior de la vivienda está comprendida en el rango de 17-24°C dependiendo de la humedad relativa del aire y de la velocidad del aire del recinto (Rodríguez, 2006). Este aspecto está directamente relacionado con la eficiencia energética ya que un buen aislamiento es el primer mecanismo térmico que preserva condiciones de confort regulando el intercambio energético entre el ambiente interior y el exterior.

Se considera que un edificio tiene eficiencia energética cuando logra tener las condiciones de confort utilizando el mínimo de energía. Este desempeño energético depende de diversos factores como: el diseño arquitectónico, el material de construcción que predomina en su estructura, y la aislación térmica que se incorpora en el sistema constructivo. Una mayor eficiencia energética repercute tanto en la disminución del impacto ambiental como en los costos de operación (por calefacción).

En este ámbito, la madera es un material que tiene una baja transmitancia térmica y que da flexibilidad para diseñar soluciones constructivas de alto desempeño energético, dado esto que las construcciones de madera, en compañía de aislantes, satisfacen los requerimientos de aislación térmica incluso en climas extremos y permiten reducir los gastos debidos al concepto de calefacción. Por el contrario, los muros de hormigón poseen una baja capacidad de oponerse al flujo de calor y, por lo mismo, deben emplearse sistemas aislantes térmicos adicionales para cumplir con regulaciones o requerimientos de eficiencia energética. Además, la estructura celular de la madera proporciona un excelente aislamiento térmico: 15 veces mejor que el hormigón armado normal, 500 veces mejor que el acero y 2.000 veces mejor que el aluminio[11].

La asociación Madera21 (fundada por CORMA) presenta un gráfico que muestra la diferencia de espesor que requieren diversos materiales para que el desempeño de aislación térmica sea equivalente al de 8cm. de CLT. Este se presenta en la Figura 6.6, donde se observa que para el hormigón se debiese considerar un espesor de 100cm.

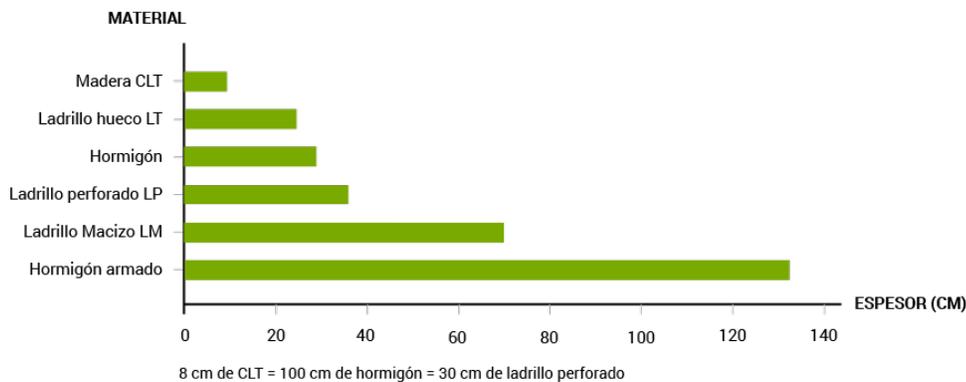


Figura 6.6: Equivalencias en desempeño de aislación térmica, variando el espesor. Fuente: Madera21.

## Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es un método que permite cuantificar el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida. El alcance depende de las etapas que se incluyan en el análisis, existen 4 clasificaciones: de la puerta a la puerta, de la cuna a la puerta, de la cuna a la tumba y de la cuna a la cuna. En la Figura 6.7 se muestran las etapas que incluye cada clasificación del ACV.



Figura 6.7: Alcances del ACV. Fuente: ZeroConsulting

La norma internacional ISO 14040 abarca dos tipos de estudio: ACV e ICV (inventario del ciclo de vida). Por su parte, el ICV corresponde a la obtención de datos conocidos como entradas y salidas, las entradas comunes corresponden al uso de recursos, materias primas y energía que se utiliza en cada fase, y las salidas comunes corresponden a emisiones al aire, agua y suelo, residuos y subproductos. Tanto la recolección de datos como la metodología a aplicar dependen del país de origen del estudio, su alcance y finalidad.

En el informe de investigación que lleva por nombre ‘Inventario de ciclo de vida para materiales de construcción en Chile: Metodología y resultados’ se entregan los coeficientes híbridos de energía incorporada para 26 materiales de construcción chilenos. Corresponde a un análisis híbrido dado que se considera tanto el análisis de procesos como el análisis económico de insumo-producto (EI-P). En la Tabla 6.3 se muestran algunos de los coeficientes híbridos entregados en el informe.

Tabla 6.3: Coeficientes híbridos de energía incorporada para materiales de construcción chilenos. Fuente: Bunster 2020.

		Cemento	Hormigón elaborado H-35	Barras de acero de refuerzo	Pino dimensionado seco	Tableros OSB estructural	Terciado estructural
Procesos	[MJ/kg]	2.6	1.7	16.9	6.4	9.9	26.0
EI-P	[MJ/kg]	2.7	2.0	1.9	4.9	10.1	14.8
<b>TOTAL</b>	<b>[MJ/kg]</b>	<b>5.3</b>	<b>3.7</b>	<b>18.8</b>	<b>11.3</b>	<b>20.0</b>	<b>40.8</b>

Luego, utilizando los coeficientes mostrados anteriormente y los pesos respectivos de cada edificación se realiza una gráfica comparativa de demanda acumulada de energía, la cual se presenta en la Figura 6.8. En esta se considera a la construcción de hormigón in-situ como referencia (100 %), obteniéndose que el hormigón prefabricado requiere un 81 % y la madera un 62 % de energía. Adicionalmente se incluye la relación entre energía renovable y no renovable que requiere cada material, que corresponde a 11 y 89 % en el hormigón y 26 y 74 % en la madera (adaptado de Montilla 2020).

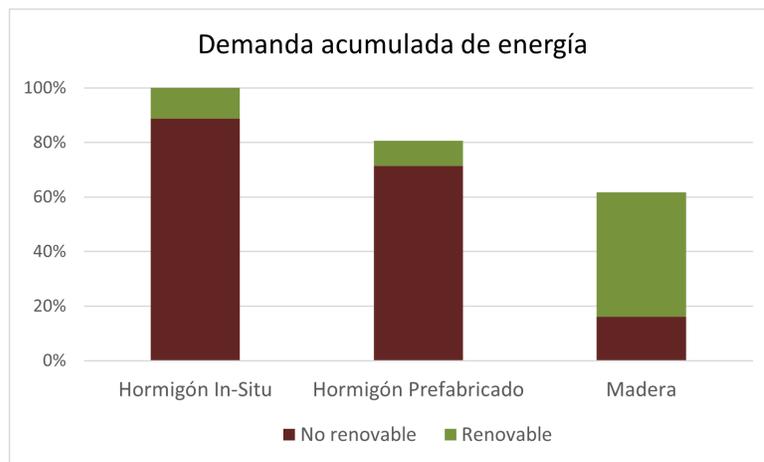


Figura 6.8: Demanda acumulada de energía requerida según edificación.

Por otra parte, dada la falta de ACV completo de materiales de construcción desarrollados específicamente para Chile, se utiliza como marco de referencia el Trabajo de Fin de Grado de Carmen Juárez Montilla de la Universidad Politécnica de Madrid que lleva por nombre “Madera vs. hormigón: fortalezas y debilidades en su uso estructural” (2020). Este trabajo considera 3 materiales (hormigón G25, Acero B500 y CLT) y recaba información para el ciclo ‘de la cuna a la cuna’ del ACV, es decir, desde la obtención de la materia prima hasta el fin de su vida (reciclaje, reutilización y eliminación del material)[12]. Para evaluar la importancia de los potenciales impactos ambientales se abordan los siguientes parámetros:

- **Calentamiento global (GWP):** Corresponde al aumento gradual observado en más de un siglo de las temperaturas de la atmósfera y océanos de la Tierra. Se busca expresar el potencial de calentamiento global, medido en [Kg.Eq CO<sub>2</sub>].
- **Agotamiento de la capa de ozono (ODP):** Se busca obtener el potencial descenso de la cantidad de ozono que se encuentra en la estratosfera terrestre debido a la liberación de diversos gases. Se mide en [Kg.Eq CFC-11].
- **Formación de oxidantes fotoquímicos (POCD):** Se busca obtener la potencial formación de los precursores que dan lugar a la contaminación fotoquímica. Se mide en [Kg.Eq C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>].
- **Acidificación (AP):** Se busca obtener la potencial alteración de la composición química y pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y agua. Se mide en [Kg.Eq de [PO<sub>4</sub>]<sup>3-</sup>].

- **Eutrofización (EP):** Se busca obtener los potenciales efectos del crecimiento excesivo de plantas y algas debido a la mayor disponibilidad de nutrientes. Se mide en [Kg.Eq SO<sub>2</sub>].

La interpretación del ACV se realiza mediante la comparación de soluciones, en este caso se tienen edificios de similares características y dimensiones, pero utilizando materiales diferentes. Resulta difícil cuantificar el efecto del hormigón prefabricado, ya que no se consigue literatura respecto al tema, por lo que la disminución en sus valores estará relacionada a que pese a estar compuesto por los mismos materiales que el hormigón in-situ, en muchas ocasiones los elementos contemplan menor peso, menor uso de hormigón in-situ y menor cantidad de residuos[13].

En la Figura 6.9.a se presenta la interpretación del ACV para los parámetros de GWP, ODP y POCD, en esta se utiliza al hormigón in situ como indicador de referencia (100%), con esto al ver el gráfico, se capta, por ejemplo, que para el calentamiento global, el hormigón prefabricado y la madera son 21 y 97% menos perjudicial, respectivamente. Por lo que estos últimos dos presentan una diferencia del 76%, lo que hace a la madera un material más amigable con el medio ambiente.

Por otra parte, en la Figura 6.9.b se presenta la interpretación del ACV para los parámetros de AP y EP, en esta se normalizan los valores de la madera a un 10%, con esto al ver el gráfico, se capta, por ejemplo, que para la acidificación el hormigón in-situ y el hormigón prefabricado son 5.7 y 4.7 veces más perjudiciales que la madera, respectivamente.

Ver Anexo B para mayores detalles de cálculo.

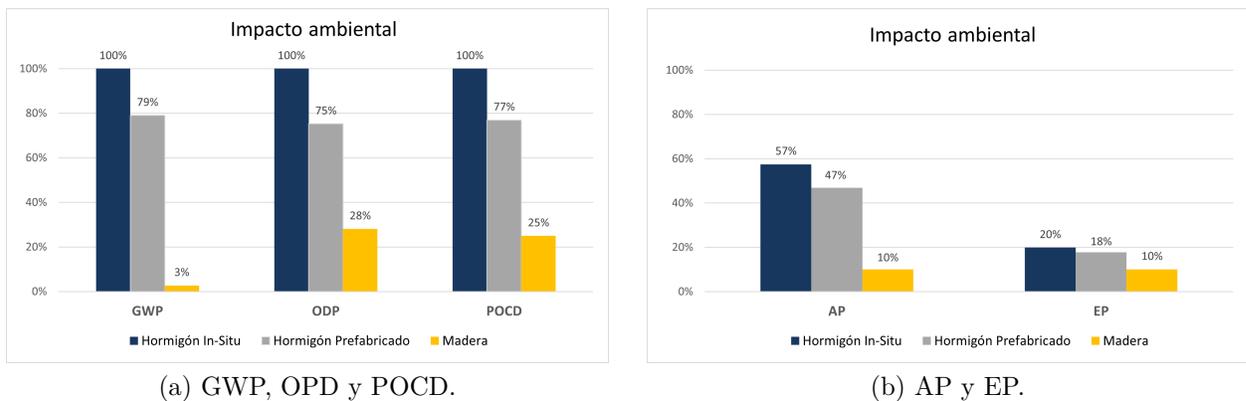


Figura 6.9: Impacto ambiental.

Según lo obtenido, el impacto ambiental de la madera (CLT en este caso) es menos perjudicial en todos los ámbitos considerados, en particular para el calentamiento global. Cabe destacar que este ACV se utiliza como referencia para comprender el comportamiento del impacto ambiental de las edificaciones según materialidad. Sin embargo, tal como se mencionó anteriormente, los datos cambian según el país, metodología y consideraciones utilizadas, por lo que las gráficas no aplican de forma precisa en Chile, no obstante, resultan útiles para el estudio.

## 6.5. Percepción de estas edificaciones

Para comprender la percepción de las edificaciones habitacionales de mediana altura, se realiza una breve encuesta a ingenieros expertos en construcciones de madera y/o hormigón prefabricado. En la encuesta se consideran diversas características agrupadas en tres categorías, donde las características con (\*) se refieren a ‘respecto al hormigón in-situ’:

- **Aspectos estructurales:** durabilidad del material, resistencia mecánica, resistencia al fuego, deformaciones adecuadas, comportamiento sísmico, e interacción suelo-fundación (tensiones en el suelo).
- **Aspectos constructivos:** facilidad de implementación, costos de obra\*, necesidad de mantenimiento\*, y factibilidad de construcción.
- **Otros aspectos:** fiabilidad del material, huella de carbono\* y comportamiento térmico.

Para esto, se les pidió evaluar con números del 1 a 5 ambas materialidades, además de asignar el nivel de importancia de cada aspecto mencionado, considerando 1 como la puntuación más desfavorable y 5 la menos desfavorable. La encuesta contó con la participación de trabajadores del CIM, de E2E y académicos de la Universidad de Chile. En la Figura 6.10 se muestra el promedio de la puntuación asignada a la importancia de cada característica.

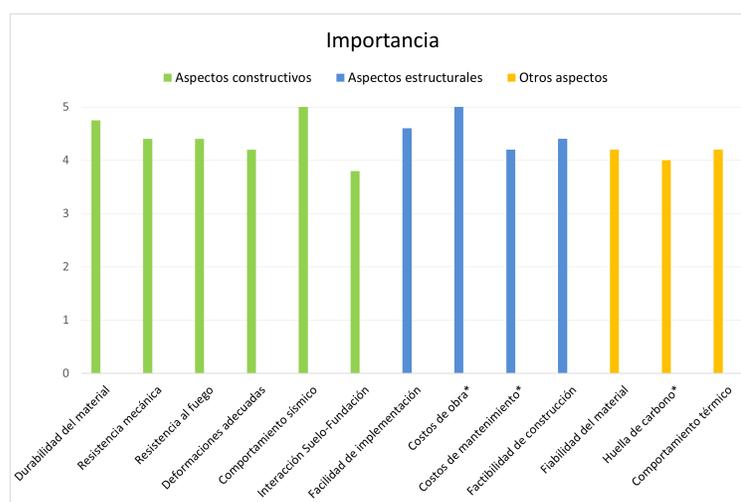


Figura 6.10: Importancia asignada a cada característica.

Las respuestas entregadas dieron a notar que las características consideradas como más relevantes (con puntuación máxima) son el comportamiento sísmico y el costo de obra, y, por el contrario, la característica de menor importancia (con puntuación 3.8) corresponde a la interacción suelo-fundación. El resto de las características obtuvieron importancias que varían entre 4.0 y 4.8. Con esto la puntuación de cada característica corresponde a una multiplicación entre el promedio de la evaluación y la importancia, por lo que la mayor puntuación posible corresponde a 25 y la menor a 1.

En la Figura 6.11 se muestra la evaluación obtenida para cada característica. Ver Anexo C para mayores detalles.

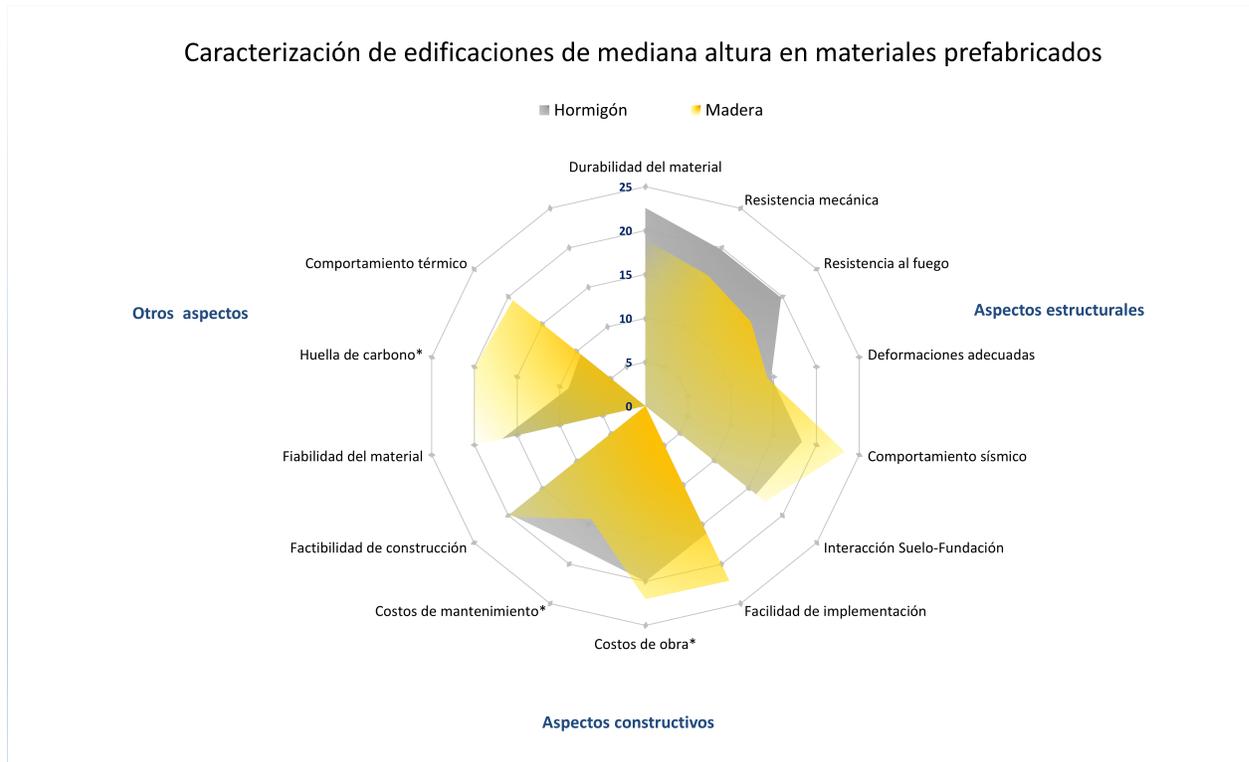


Figura 6.11: Resultados de la encuesta de evaluación de ambos materiales.

Como se puede observar en la gráfica, la madera presenta ventajas en los dos aspectos considerados más importantes (comportamiento sísmico y costo de obra), además de la interacción suelo-fundación, la facilidad de implementación, la factibilidad de construcción y en la categoría completa de 'Otros aspectos'. Por su parte, el hormigón prefabricado presenta ventaja mayormente en la categoría de 'Aspectos estructurales', particularmente en la durabilidad del material, la resistencia mecánica, la resistencia al fuego, y las deformaciones adecuadas. Fuera de esta categoría, solo presenta ventaja en los costos de mantenimiento. A su vez, la menor puntuación de la madera corresponde a las deformaciones adecuadas y los costos de mantenimiento, y la del hormigón prefabricado a la contribución por disminuir la huella de carbono y el comportamiento térmico. Por otra parte, la característica que presentan con mayor similitud corresponde a la factibilidad de construcción, y, por el contrario, la característica con mayor diferencia en puntuación corresponde a la huella de carbono. Con esto, al realizar un promedio entre la puntuación obtenida por cada material, se obtienen 19 puntos para la madera y 17 puntos para el hormigón prefabricado, lo que refleja que, pese a que la madera presente ventajas en muchas más características, el hormigón prefabricado al presentar ventajas principalmente en los aspectos estructurales, los que cuentan con alta importancia, hace que la diferencia se calibre, quedando la madera levemente por sobre el hormigón. Cabe destacar que esta caracterización se debe a un grupo acotado de personas, sin embargo, con vasta experiencia en el ámbito.

# Capítulo 7

## Conclusiones

A partir de las investigaciones realizadas a lo largo del trabajo, y en particular de lo obtenido en el análisis comparativo, se pueden establecer conclusiones para cada ámbito abordado en el trabajo.

### **Contribución de la industrialización**

Si bien este punto no se aborda explícitamente en el informe, cabe mencionar que el contexto de estos dos materiales analizados se encuentra bajo conceptos clave como prefabricación e industrialización. Los sistemas prefabricados presentan diversas ventajas, como aumentar la eficiencia de los procesos y del uso de los materiales ya que se trata de la fabricación de elementos en ambientes controlados, con lo que se disminuye la generación de residuos e incertidumbres. Adicionalmente, permite aumentar la calidad y precisión de los componentes, y como se puede alcanzar un mayor control de los programas, se puede secuenciar la fabricación, el almacenaje y el transporte para minimizar el trabajo en obra, disminuyendo incertidumbres.

Por una parte, el uso de prefabricados disminuye los tiempos en obra y por ende los costos del proyecto, sin embargo, se requiere de una mayor dedicación en el diseño en etapas tempranas, es por esto que se considera esencial aumentar la difusión del conocimiento técnico de los diseñadores y constructores, con el fin de tener una mano de obra altamente calificada. Por otra parte, se debe colaborar interdisciplinariamente en planta y obra para no desestimar los diversos criterios presentes en las fases de diseño y construcción, necesarios para la sinergia del proyecto.

Asimismo, dadas las múltiples ventajas de la industrialización, deben existir incentivos para dar paso a un aumento en su uso, el cual se ha basado principalmente en la utilización de madera como materia prima, sin embargo, actualmente está aumentando el campo de la industria de prefabricados de hormigón, lo que se ve reflejado en el crecimiento de empresas como Baumax, la cuál inició en el país en 2017, trayendo consigo la llegada de la primera planta en Chile y América Latina de construcción robotizada en hormigón, abarcando proyectos que van desde casas hasta edificios habitacionales e industriales. Según sus propias declaraciones, su tecnología es capaz de reducir los tiempos de construcción en un 30 % respecto al sistema tradicional, ya que puede producir en tan solo un día cuatro casas de 140m<sup>2</sup> y en tres, montarla. Finalmente, con los antecedentes recabados, se considera que la industrialización, al ayudar en el aumento de la productividad del sector de la construcción, contribuye directamente a mejorar el déficit habitacional nacional, ámbito que vivió un fuerte incremento tras la pandemia.

## Durabilidad y resistencia estructural

Según las comparaciones realizadas, se puede concluir que ambos materiales, pese a tener diferentes propiedades y consideraciones de diseño, no solo son capaces de cumplir con la vida útil que se estipula para las edificaciones habitacionales, sino que también garantizar su durabilidad por un tiempo mucho mayor. Esto difiere particularmente de la percepción social sobre la madera, por lo que resulta esencial educar al usuario en el conocimiento del material, las ventajas y limitaciones.

En este ámbito, la calidad de la madera es esencial para garantizar la durabilidad, en especial para el caso del pino radiata, ya que, corresponde a la madera más utilizada en el sector de la construcción, esto se debe a que, si bien existen maderas nobles que presentan mejores propiedades, además de presentarse con mayor escasez, traen consigo altos precios. Esto obliga a tener un diseño cuidadoso y una mantención mayor en los elementos de soporte de madera.

Además, pese a que la calidad de la madera comercial ha mejorado notablemente, se requiere la implementación de un mercado de comercialización transparente de los productos de madera que además especifique las diferencias según los productos de madera que se estén considerando, ya que por ejemplo, no es lo mismo considerar un sistema constructivo de CLT a considerar un sistema marco plataforma de MLE. Es necesario tanto un mayor desarrollo en el conocimiento del diseño y construcción, como también llevar a cabo y promover proyectos icónicos de mayor escala que fomenten su uso y sus beneficios estructurales, ya que actualmente se asocia la prefabricación de madera con viviendas aisladas unifamiliares o con campamentos mineros y similares, bastante lejano a edificaciones de mediana altura.

Por otra parte, en cuanto a la resistencia mecánica de las edificaciones, se puede considerar que ambos materiales, que tienen distintas propiedades y que se diseñan con distintos métodos, al ser adecuadamente diseñados, son capaces de cumplir los requerimientos de carga. El diseño del hormigón se vio controlado por el sismo tanto para muros como vigas, y el diseño de la madera se vio controlado en general por el efecto del sismo, pero también por el efecto del viento en el diseño de los pies derechos. Esta diferencia se relaciona con la diferencia de peso de las estructuras, que hace a la edificación de madera más ligera, lo que a la vez disminuye su corte basal.

En cuanto al análisis sísmico, en el caso de la madera, su flexibilidad la hace muy resiliente ante sismos, sin embargo, esta misma característica limita su altura, ya que se llegan a tener deformaciones no controlables que sobrepasan los límites normativos. Por el contrario, para el caso del hormigón, este demuestra cumplir con los límites de deformaciones sin mayores impedimentos. Lo que tal como se mencionó en el capítulo anterior, tiene relación con el enfoque de la normativa chilena sobre el diseño sísmico de estructuras, el cual está ideada principalmente para las estructuras de hormigón armado y no de madera. Es más, una investigación numérica y experimental que apunta a proponer factores de diseño sísmico menos restrictivos para edificaciones marco-plataforma obtuvo que cambiar los factores de diseño sísmicos reduce el margen de colapso de estructuras marco-plataforma[14].

Un aspecto esencial para los sistemas prefabricados en general corresponde al estudio sobre las uniones entre elementos prefabricados, como para las conexiones entre paneles, o las conexiones con losas y/o entrepisos, ya que, al considerar edificaciones de mediana altura, se tienen solicitaciones estructurales importantes, y las conexiones son fundamentales para asegurar su buen comportamiento sísmico, por lo que es necesario fomentar esta clase de estudios.

## Resistencia al fuego

A partir de los aspectos comparados a lo largo de este trabajo, se puede concluir que el hormigón armado, debido al comportamiento de sus materiales, presenta ventajas significativas por sobre la madera, ya que al ser un material no combustible y de baja conductividad, proporciona una protección intrínseca al fuego. En cambio, la combustibilidad de la madera es una de las principales razones por las que se ven limitaciones en su uso estructural[15].

Otra de las ventajas relevantes del hormigón es que, al ser tratado como un material genérico, cuenta con estándares básicos para cumplir con la normativa, por el contrario los sistemas constructivos de madera, por lo general, poseen múltiples capas, como el sistema de paneles de entramado de madera, y por ende cualquier cambio en uno de sus componentes, por ejemplo el cambio de una placa de OSB por panel terciado, significará la necesidad de realizar estudios de laboratorio o informes de asimilación de soluciones. Respecto a este punto, se menciona el desarrollo de un anteproyecto de norma (realizado por IDIEM) que busca incorporar modelos analíticos y prescriptivos de cálculo de resistencia al fuego para estructuras de madera. Este anteproyecto impactará positivamente en algunas limitantes de la resistencia al fuego de la madera, facilitando la especificación de diferentes sistemas o variantes.

Otro aspecto que resulta importante mencionar respecto a la normativa vigente en Chile es que presenta algunas deficiencias en comparación a normativas de países desarrollados, como que no hace especial referencia a la compartimentación de edificaciones frente al fuego y a la propagación del humo[16]. Lo que resulta relevante para salvaguardar la vida humana frente a un incendio, sobre todo cuando nos enfrentamos a edificaciones en madera de mayor altura. Por su parte, el hormigón no desprende ningún tipo de humo, gases o vapores tóxicos al verse afectado por el fuego[17].

Pese a lo mencionado, se puede considerar que ambos materiales son capaces de cumplir con la normativa vigente. Es más, existen equivalencias en clasificación para algunas soluciones presentes en el Listado Oficial de Comportamiento al Fuego (MINVU-2014), en las que se repara que las soluciones de madera tienden a tener mayores dimensiones que las de hormigón. Sin embargo, esto no niega las dificultades que actualmente aquejan a las estructuras de madera, no solo a nivel nacional, sino que a nivel mundial, como se explica en un documento desarrollado a partir de consultas e investigaciones entre el Australasian Fire and Emergency Service Authorities Council Limited (AFAC), sus miembros y las partes interesadas, que tiene por objeto abordar cuestiones relevantes para los incendios y para la gestión del territorio de la región del Pacífico[18]. En este destacan:

- Es altamente recomendable generar una estrategia de seguridad contra incendios para definir metas, objetivos y separar los riesgos asociados, con el fin de obtener resultados similares a los de un edificio convencional que satisface los criterios requeridos. Adicionalmente, se deben tener las precauciones debidas contra incendios durante las distintas etapas de la obra, que van desde la construcción hasta la puesta en marcha, abordando los riesgos y la disposición del sistema de seguridad desde el inicio, adecuado al tamaño y orientación del edificio, y a la protección activa que se contemple. Además, se hace hincapié en el cumplimiento de la norma para los sistemas de seguridad, acompañada de una buena gestión de las áreas que resultan clave para la evacuación ante cualquier emergencia, velando por mantener estas zonas libres de combustibles.

- El uso de la madera estructural implica la participación de materiales combustibles dentro de la edificación misma, lo que puede presentar una serie de inconvenientes como la presencia de alta combustibilidad dentro de las vías de salida, zona de balcones y en espacios ocultos, siendo un potencial peligro, así como también el aporte en la carga de fuego de la madera en el incendio, lo que equivale a un aumento en la magnitud del riesgo. Asimismo, otra consideración relevante corresponde al potencial de colapso estructural en especial durante actividades claves como el rescate de bomberos y el proceso de extinción del fuego, ya que, la madera puede seguir quemándose incluso en etapas finales del incendio, lo que en dado caso incide en el peligro al colapso, transformándose en un punto débil para este tipo de construcciones. Este fenómeno cesa una vez la madera se ‘autoextingue’, lo que corresponde a una condición límite en el que el suministro de vapor combustible de la llama de la sección de madera se encuentra por debajo de la cantidad de vapor combustible necesaria para que esta arda.

Esto resulta relevante para comprender las diferencias normativas que existen entre algunos países, las que impactan en factores como la altura máxima permitida y el tipo de uso de estas edificaciones, además de la percepción de inseguridad que esto genera en usuarios.

### **Procesos constructivos**

Para comenzar, se menciona que ambas materialidades siguen la misma secuencia constructiva, ya que ambos comprenden elementos realizados en fábrica. Las obras analizadas estiman que una mayor parte del tiempo está destinada a la obra gruesa, sin embargo, las partidas que por sí solas contemplan más duración son las terminaciones e instalaciones. Aunque la comparación es compleja y depende de muchos factores, los resultados de este trabajo muestran certezas en la reducción de los tiempos de construcción de las construcciones de madera, lo que permite apoyar el uso de nuevas tecnologías que por ende son más costosas. En particular, la madera obtuvo un 20 % de ventaja sobre el tiempo dedicado a la obra completa del hormigón prefabricado. Además, si se hace una comparación entre los tiempos de montaje, los elementos de madera contemplan un 45 % menos del tiempo, lo que equivale a una velocidad de montaje 8 veces mayor. Esto puede deberse a dos cosas, por una parte, los elementos de madera tienen menor peso por ende la maquinaria utilizada y secuencia de montaje son más eficientes, y el hormigón considera conexiones que en muchas ocasiones son húmedas, por lo que requieren más tiempo ya que es necesario esperar que el hormigón alcance su resistencia mínima a los tres días.

Por otra parte, con respecto a los costos, los resultados arrojaron que existe una leve diferencia entre los costos directos de obra, que dan una ventaja del 5 % a la madera. En particular, para el costo de los elementos prefabricados propiamente tal, se estima que la madera tiene un costo menor con un 6 % de ventaja. Cabe recordar que las estimaciones se realizaron a partir de distintos documentos y proveedores, por lo que resultaría provechoso contar con datos estandarizados para disminuir errores y diferencias. En este sentido, los sistemas prefabricados han abierto una alternativa muy competitiva para soluciones habitacionales, tanto por los tiempos de construcción como por los costos. En particular, el uso del hormigón prefabricado se ha generalizado en la industria por su rapidez y menor costo que el hormigón in-situ. Sin embargo, para el caso de la madera, con excepción de la MLE, esta no ha tenido grandes avances. No obstante, se espera que el condominio Horizonte del Pacífico (considerado en el caso estudio) sirva de ejemplo para fomentar el aumento en las edificaciones de madera en mediana altura.

## Aspecto medio ambiental

Este punto fue abordado de forma superficial en el capítulo previo, dado que un análisis minucioso estaba fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, es un aspecto fundamental en el desarrollo de construcciones sostenible. Las investigaciones y resultados obtenidos permiten dar cuenta de la gran ventaja que presenta la madera sobre el hormigón in-situ y prefabricado, entre estas se mencionan:

- La demanda acumulada de energía requerida por la madera, además de ser un 19 % menor a la requerida por el hormigón prefabricado, proviene mayormente (en un 74 %) de energía renovable, lo que lo hace un material más amigable con el medio ambiente.
- La interpretación del ACV realizado indica que la madera (particularmente CLT) tiene menor impacto en todos los parámetros analizados: calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación y eutrofización. En particular, existe una diferencia importante con el hormigón prefabricado (del 76 %) en cuanto al potencial de calentamiento global, donde se estimó un impacto del 3 % de la madera sobre una construcción in-situ. Incluso existen algunas bibliografías donde se considera a la madera como el único material de construcción con balance de carbono negativo, ya que el CO<sub>2</sub> almacenado en los árboles es mayor a las emisiones asociadas al procesamiento del material. (INFOR 2021)
- En 2019, Chile contemplaba una superficie forestal de 18.04 millones de ha (INFOR 2020) donde las plantaciones de pino radiata cubren la mayor parte de esta superficie con el 55.8 %. Además, la oferta de MLE en el mercado local fue cercana a 19.000 m<sup>3</sup> en 2020 (INFOR 2021), donde el 76 % de la producción de MLE es de madera de pino radiata. Específicamente para el pino radiata, se considera que es de menor densidad y de crecimiento rápido (cultivo entre los 15 y 20 años) lo que se ve favorecido por el clima chileno. Con esto se concluye que Chile puede abastecer la demanda de madera de ser necesario.
- La transmitancia térmica de la madera le proporciona un excelente aislamiento térmico que puede ser 15 veces mejor que el hormigón armado normal. Esto se relaciona directamente con la eficiencia energética de la edificación ya que requiere menos energía para lograr el confort térmico, es decir, menor calefacción, lo que repercute tanto en el medio ambiente como en los costos de operación.

Esto se refleja de igual forma en la caracterización obtenida a través de las encuestas, en las cuales se obtuvo que la mayor desventaja que presenta el hormigón corresponde a su impacto en la huella de carbono, generada a través de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Respecto a estas emisiones, vale mencionar que los mayores impactos provienen del uso de cemento y del proceso de transportes indirectos de las materias primas (principalmente de áridos).

Es por esto que, un punto en el que enfatizar, corresponde a buscar soluciones que permitan disminuir las emisiones generadas en la producción de hormigón. Existen algunos trabajos que estudian el uso de aditivos para disminuir la demanda de energía, sin embargo, su impacto seguiría estando en gran desventaja con respecto a la madera. Por otra parte, puede ser útil contar con un ACV del ciclo 'de la cuna a la cuna' de los materiales de construcción más comunes (hormigón in-situ, hormigón prefabricado y madera), para tener cifras certeras del impacto ambiental de las edificaciones en el país.

## Recomendaciones y trabajo futuro

Tal como se mencionó en el inicio de este trabajo, el uso de la madera estructural está muy por debajo del uso del hormigón (<4% en mediana altura). En la actualidad, empresas como Tecnofast y E2E, han impulsado el desarrollo de proyectos industrializados de madera, con calidad superior y competitivos en sus costos. Sin embargo, aun cuando muchas de las características de la madera dan pie a promover una mayor incorporación en el mercado, debemos adecuarnos a la realidad nacional, donde su uso se ha visto postergado.

Un aspecto que se debe valorar es de dónde surge el bajo interés nacional por construir con madera, lo que se ve reflejado en todas las alturas de edificación. Estas diferencias no se presentan en otros países como Canadá, Estados Unidos o Nueva Zelanda, por lo que es importante comprender la percepción del uso de madera en construcción, la cual puede considerarse negativa debido a antecedentes en malos diseños, falta de difusión técnica, uso de materiales de mala calidad, viviendas consideradas culturalmente como baratas y de poca duración. Esto se contradice con lo estudiado y obtenido en este trabajo, ya que la madera posee un importante valor estructural, buen comportamiento térmico, y con diseño adecuado tiene alta durabilidad. Es por esto que, es preciso fomentar las construcciones en madera, y ampliar su finalidad mediante el desarrollo de proyectos urbanos y/o edificios comerciales detonantes que demuestren el potencial del material y de la tecnología de los materiales industrializados, así como también resulta vital impulsar el crecimiento y desarrollo de las empresas vinculadas a productos de madera.

A medida que avanza el tiempo avanzan las tecnologías, y para ver estos avances reflejados en la industria de la construcción, resulta necesario impactar en la productividad, innovación y sustentabilidad ambiental. Esto se puede lograr mediante un plan de acción impulsado por expertos en el tema, haciendo hincapié en el fomento del uso de sistemas constructivos de menor impacto ambiental, es decir, que consideren menor huella de carbono, mayor eficiencia energética y una generación menor de residuos. En este punto, resulta clave mencionar que, si bien en varios de los puntos presentados la madera presenta ventajas sustanciales para el desarrollo sostenible, el fomento del uso de nuevas tecnologías aplica sin promover exclusivamente un material por sobre otro, sino que, tal como se mencionó en el primer punto, a la industrialización de la construcción en general, ya que entrega muchos de estos beneficios.

Por otra parte, una materia que no fue contemplada en este estudio corresponde a las construcciones mixtas de madera y hormigón, las cuales podrían ser claves para la transición en la elección de materiales, ya que el propósito de este proyecto es dar bases para el uso de estos dos materiales, y no el abandono de alguno de ellos. Respecto a esto, el estudio de factibilidad de sistemas mixtos pueden ser un gran aporte para el desarrollo de la industria, e incluso puede servir para la inclusión de la madera estructural en edificaciones de mayor altura.

Finalmente, si bien la realización de evaluaciones estructurales y ambientales sirven como sustento teórico para estos tipos de construcciones, y corresponden a la base de los cambios, no aseguran por completo el estímulo en aumentar su uso en el sector, por lo que resulta necesario ampliar el análisis de los resultados obtenidos, más allá de meras estimaciones, para implementar políticas e incentivos basados en la información que este tipo de investigaciones entrega, lo que significa utilizar de manera consciente y explícita la evidencia al tomar decisiones o al elegir entre políticas alternativas sobre el desarrollo del sector de construcción del país. Es por esto que, se aconseja llevar a cabo un plan de desarrollo y bienestar que sea acorde a las necesidades actuales de la sociedad y del país, fomentando las construcciones de calidad en conjunto a su capacidad sustentable.

# Glosario

ACV: Análisis de Ciclo de Vida.

AP: *Acidification Potential* o potencial de acidificación en español.

ATS: *Anchor Tiedown System*.

CLT: *Cross Laminated Timber* o Madera Laminada Cruzada en español.

CORFO: Corporación de Fomento de la Producción.

CORMA: Corporación Chilena de la Madera.

CWP: *Global Warming Potential* o potencial de calentamiento global en español.

EP: *Eutrophication Potential* o potencial de eutrofización en español.

ICH: Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile.

ICV: Inventario de Ciclo de Vida.

IDIEM: Investigación, desarrollo e innovación de Estructuras y Materiales.

INE: Instituto Nacional de Estadística.

INFOR: Instituto Forestal de Chile.

LGUC: Ley General de Urbanismo y Construcciones.

MDF: *Medium Density Fibreboard* o fibropanel de densidad media en español.

MINVU: Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

MLE: Madera laminada encolada.

ODP: *Ozone Layer Depletion* o agotamiento de capa de ozono en español.

OGUC: Ordenanza General de Urbanismo y Construcción.

OSB: *Oriented strand board* o tablero de virutas orientadas en español.

POCD: *Formation Potential of Tropospheric Ozono* o formación de oxidantes fotoquímicos en español.

# Bibliografía

- [1] Wiche, P., Rodríguez, B., Granato, D. Estado del Arte de Huella de Carbono para Edificaciones: Resumen para Tomadores de Decisiones. Publicado por Instituto de la Construcción, 2020. Santiago, Chile. Disponible en <https://certificacionsustentable.cl/wp-content/uploads/2021/01/Producto-4-Resumen-para-tomadores-de-decisiones-FINAL.pdf>
- [2] Instituto Forestal (Chile) (2020). Anuario Forestal 2020. INFOR. Disponible en <https://wef.infor.cl/publicaciones/anuario/2020/Anuario2020.pdf>
- [3] Pérez Galaz, V. (1990). Manual 13: Manual de cálculo de construcciones en madera. 2a. edición. Santiago, Chile: INFOR. Disponible en <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/6649>
- [4] Ziolk, M. (2014). Strength resistance of structural, prefabricates, reinforced concrete elements. Informes de la Construcción. 23. 75-83. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/274113546\\_Resistencia\\_al\\_fuego\\_de\\_elementos\\_estructurales\\_prefabricados\\_de\\_hormigon\\_armado/fulltext/5ab933eb0f7e9b68ef5328c6/Resistencia-al-fuego-de-elementos-estructurales-prefabricados-de-hormigon-armado.pdf](https://www.researchgate.net/publication/274113546_Resistencia_al_fuego_de_elementos_estructurales_prefabricados_de_hormigon_armado/fulltext/5ab933eb0f7e9b68ef5328c6/Resistencia-al-fuego-de-elementos-estructurales-prefabricados-de-hormigon-armado.pdf)
- [5] Catalán, LV (2007). Seguridad frente al fuego de las estructuras de hormigón. Plataforma tecnológica española de hormigón. Disponible en [https://www.andece.org/images/BIBLIOTECA/fuego\\_buron\\_ieca.pdf](https://www.andece.org/images/BIBLIOTECA/fuego_buron_ieca.pdf)
- [6] Ramírez, A. (2001). Comportamiento de la madera frente al fuego y su protección. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Disponible en [https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay/alma991002694549703936/56UDC\\_INST:56UDC\\_INST](https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay/alma991002694549703936/56UDC_INST:56UDC_INST)
- [7] Ortíz, D. (2018). Análisis normativo y estudio estadístico de ensayos de resistencia al fuego de elementos divisorios horizontales y verticales en base a madera realizados en Chile. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152675>
- [8] Macari Lagos, R. (2015). Criterios que determinan los requerimientos de resistencia al fuego de elementos estructurales. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/136490>
- [9] Sáez Salazar, P. (2006). Estacionamiento Subterráneo con elementos prefabricados de Tensocret. Tesis para optar al título de Constructor Civil. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile. Disponible en <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmficis127e/doc/bmficis127e.pdf>

- [10] Sika (2020) Hormigón soluciones sostenibles. Más valor menos impacto. Disponible en <https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/01480671-6c80-385b-af0d-e1c31e2ab39e/Construcciones%20Sostenibles%20de%20hormigon.pdf>
- [11] Instituto Forestal (Chile) (2020). La madera es un material de construcción sustentable. Tecnología y Productos de Madera INFOR. Disponible en <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/30377>
- [12] Montilla, Carmen (2020). Madera vs hormigón: fortalezas y debilidades en su uso estructural. Universidad politécnica de Madrid. Disponible en <https://oa.upm.es/63770/>
- [13] Valenzuela Rosas, R. (2018). Evaluación de sistemas constructivos para edificios de mediana altura con elementos de hormigón prefabricado. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169982>
- [14] Estrella Arcos, Edisson Xavier (2020) Seismic performance factors for wood frame buildings in Chile. Disponible en <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/48200>
- [15] Birgit Östman, Daniel Brandon, Håkan Frantzich (2017), Fire safety engineering in timber buildings, Fire Safety Journal, Volume 91, Pages 11-20. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.002>
- [16] Mahuzier, J. (2017). Requerimientos sobre la resistencia al fuego y traspaso de humos en puertas usadas en los edificios. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/144282/Requerimientos-sobre-la-resistencia-al-fuego-y-traspaso-de-humos-en-puertas-usadas-en-los-edificios.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [17] Plataforma europea del hormigón (2008). Resistencia al fuego. Seguridad y protección completa frente al fuego con hormigón. Disponible en <https://anfah.org/wp-content/uploads/pdf/articulo-tecnico-seguridad-frente-al-fuego.pdf>
- [18] Australasian Fire and Emergency Service Authorities Council 2018. Fire Safety Principles for Massive Timber Building Systems (AFAC Publication No. 3081). AFAC, Melbourne, Australia. Disponible en <https://www.esa.act.gov.au/sites/default/files/2019-06/massive-timber-buildings.pdf>

# Anexo A

## Cálculo en madera

### Rigidez equivalente de los muros de corte

Al evaluar la Ecuación 3.4 en un muro de n pisos (primer piso corresponde a n=1), y considerando un giro por piso ( $\Delta_a/b$ ) acumulado en altura tal como es indicado en la Figura A.1, se obtiene la Ecuación A.1.

$$\delta = \frac{8 \cdot v_n \cdot h_n^3}{E_n \cdot A_n \cdot b_n} + \frac{v_n \cdot h_n}{1000 \cdot G_{a,n}} + h_n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_{a,i}}{b} \quad (\text{A.1})$$

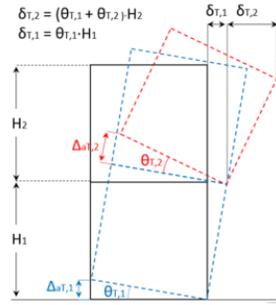


Figura A.1: Giro acumulado por piso por elongación del ATS. (MdC-HdP)

Cabe destacar que la expresión que se presenta en la Ecuación 3.4 (Courtesy of the American Wood Council, Leesburg, VA.) es para uso en unidades inglesas, mientras que la Ecuación A.2 corresponde a la misma ecuación adaptada para uso de unidades en sistema internacional.

$$\delta = \delta_f + \delta_c + \delta_e = \frac{2}{3} \frac{v \cdot h^3}{E \cdot A \cdot b} + \frac{v \cdot h}{G_a} + \frac{h \cdot \Delta_a}{b} \quad (\text{A.2})$$

Donde: h es la altura del muro [m], b es el largo del muro [m], E es el Módulo de elasticidad de los PDB del muro [kN/m<sup>2</sup>], A es el área transversal de los PDB de un extremo del muro [m<sup>2</sup>], v es el corte por unidad de largo actuante en el muro ( $v = V/L$ ) [kN/m],  $G_a$  es la rigidez de corte aparente del muro debida al deslizamiento del clavo y la deformación por corte del tablero [kN/m], y  $\Delta_a$  es la deformación total vertical del anclaje 'a' producto de la fuerza axial generada producto del momento volcante del muro [m].

## Capacidad de las barras ATS

Las capacidades de las barras ATS sometidas a tracción son calculadas como el mínimo entre los siguientes estados límite: fluencia del área bruta y fractura del área neta, siguiendo la Ecuación , definida en la norma ANSI/AISC 360-10. Donde  $\frac{P_n}{\Omega_t}$  corresponde a la resistencia admisible.

$$\frac{P_n}{\Omega_t} = \min \left\{ \frac{F_y \cdot A_g}{1.67}; \frac{f_u \cdot A_e}{2.00} \right\} \quad (\text{A.3})$$

## Cálculo de fuerzas internas en los muros para verificar sus elementos

- La tensión de trabajo de flexión ( $F_f$ ) está dada por la razón entre el momento máximo y el módulo de flexión de la sección neta (calculado según la teoría de la capa paralela (*Parallel Ply Theory*)), como se muestra en la Ecuación A.4.

$$f_f = \frac{M_{max}}{W_n} \quad (\text{A.4})$$

- La tensión de trabajo de compresión paralela a la fibra del elemento ( $f_{cp}$ ) está dada por la razón entre la carga axial y el área transversal del elemento, como se muestra en la Ecuación A.5.

$$f_{cp} = \frac{N}{A} \quad (\text{A.5})$$

- La tensión de diseño en flexión paralela a la fibra del elemento ( $F_f^{dis}$ ) está dada por el producto entre la tensión admisible en flexión, el factor de modificación por contenido de humedad, el factor de modificación por duración de la carga, el factor de modificación por trabajo en conjunto, y el factor de modificación por volcamiento, como se muestra en la Ecuación A.6.

$$F_f^{dis} = F_f \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_C \cdot K_{\lambda V} \quad (\text{A.6})$$

- La tensión de diseño en compresión paralela a la fibra del elemento ( $F_{cp}^{dis}$ ) está dada por el producto entre la tensión admisible en compresión paralela a la fibra, el factor de modificación por contenido de humedad, el factor de modificación por duración de la carga, y el factor de modificación por esbeltez, como se muestra en la Ecuación A.7.

$$F_{cp}^{dis} = F_{cp} \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_{\lambda} \quad (\text{A.7})$$

- La interacción de flexo-compresión del elemento está dada por la Ecuación A.8. Con  $F_{cE}$  como la tensión de diseño en compresión efectiva.

$$\left( \frac{f_{cp}}{F_{cp}^{dis}} \right)^2 + \frac{f_f}{\left( 1 - \frac{f_{cp}}{F_{cE}} \right) \cdot F_f^{dis}} \quad (\text{A.8})$$

- La tensión de diseño por compresión normal a la fibra ( $F_{cn}^{dis}$ ) está dada por el producto entre la tensión admisible en compresión normal a la fibra, el factor de modificación por contenido de humedad, y el factor de modificación por aplastamiento, como se muestra en la Ecuación A.9.

$$F_{cn}^{dis} = F_{cn} \cdot K_H \cdot K_{cn} \quad (\text{A.9})$$

- La tensión de diseño por cizalle del elemento ( $F_{cz}^{dis}$ ) está dada por el producto entre la tensión admisible de cizalle, el factor de modificación por contenido de humedad, el factor de modificación por duración de la carga, y el factor de modificación por rebaje (inferior o superior), como se muestra en la Ecuación A.10.

$$F_{cz}^{dis} = F_{cz} \cdot K_H \cdot K_D \cdot k_r \quad (\text{A.10})$$

## Cálculos en viga

Las siguientes expresiones aplican para una viga simplemente apoyada con una carga uniforme distribuida en todo el largo ( $w$ ):

- La demanda de momento ( $M_{max}$ ) está dada por la Ecuación A.11.

$$M_{max} = \frac{w \cdot L^2}{8} \quad (\text{A.11})$$

- La demanda de corte ( $V_{max}$ ) está dada por la Ecuación A.12.

$$V_{max} = \frac{w \cdot L}{2} \quad (\text{A.12})$$

Las siguientes expresiones aplican para una viga simplemente apoyada con una carga uniforme distribuida en todo el largo ( $w$ ) y una carga puntual ( $P$ ) aplicada en el centro:

- La demanda de momento ( $M_{max}$ ) está dada por la Ecuación A.13.

$$M_{max} = \frac{w \cdot L^2}{8} + \frac{P \cdot L}{4} \quad (\text{A.13})$$

- La demanda de corte ( $V_{max}$ ) está dada por la Ecuación A.14.

$$V_{max} = \frac{w \cdot L}{2} + \frac{P \cdot L}{2} \quad (\text{A.14})$$

- La máxima deflexión de la viga ( $\Delta_{max}$ ) está dada por la Ecuación A.15.

$$\Delta_{max} = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot EI} + \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot EI} + \frac{w \cdot L^2}{K} \quad (\text{A.15})$$

- La frecuencia fundamental de la viga ( $f$ ) está dada por la Ecuación A.16.

$$f = 1.57 \cdot \sqrt{\frac{386 \cdot EI}{W \cdot L^3}} \quad (\text{A.16})$$

# Anexo B

## Cálculos de Impacto Ambiental

Tabla B.1: Valores considerados para el ACV (por tonelada de material), donde las etapas A-C corresponde desde la obtención de la materia prima hasta su eliminación, y la etapa D corresponde a la reutilización y reciclaje (Montilla 2020).

	Etapas ACV:	Hormigón		Acero		Madera (CLT)	
		A-C	D	A-C	D	A-C	D
GWP	[kg CO2-eq.]	108,6	-1,9	2190,7	-585,4	473,8	-453,9
AP	[kg SO2-eq.]	0,2408	-0,0041	9,4065	-1,1399	2,4209	-2,9517
EP	[kg PO43-eq.]	0,0380	-0,0006	0,6040	-0,0771	0,5506	-0,8012
POCD	[kg C2H4-eq.]	0,0125	-0,0020	0,8577	-0,2958	0,3125	-0,2753
ODP	[kg CFC-11.]	5,09E-09	-1,44E-11	7,53E-06	-3,38E-06	7,24E-05	-4,96E-05

Tabla B.2: Pesos del caso estudio considerados para el ACV.

<b>In-Situ</b>	[ton]	<b>Prefabricado</b>	[ton]	<b>Madera</b>	[ton]
Hormigón	880,7	Hormigón	721,4	Peso	221,5
Acero	42,3	Acero	31,7		

Tabla B.3: Resultados para el cálculo de ACV.

	Según peso de la estructura			Relación respecto al hormigón in-situ		
	Hormigón In-Situ	Hormigón Prefabricado	Madera	Hormigón In-Situ	Hormigón Prefabricado	Madera
AP [kg SO2-eq.]	558	433	-118	100 %	78 %	-21 %
EP [kg PO43-eq.]	55	44	-55	100 %	79 %	-100 %
GWP [kg CO2-eq.]	161845	127930	4395	100 %	79 %	3 %
ODP [kg CFC-11.]	1,80E-04	1,35E-04	5,05E-05	100 %	75 %	28 %
POCD [kg C2H4-eq.]	33	25	8	100 %	77 %	25 %

# Anexo C

## Encuestas

Tabla C.1: Interpretación de la puntuación asignada.

Característica del material:		Importancia del aspecto evaluado:	
1	No presenta la propiedad / característica	1	Irrelevante para la construcción
2	Cuenta levemente con la propiedad	2	Casi irrelevante / poca importancia
3	Cuenta parcialmente con la propiedad	3	Término medio / relativo
4	Cuenta con la propiedad casi por completo	4	Casi esencial para la construcción
5	Cuenta con la propiedad de manera excepcional	5	Fundamental para la construcción

Tabla C.2: Valores y resultados de las encuestas de percepción sobre madera y hormigón prefabricado. En naranja corresponde a madera, en gris corresponde a hormigón prefabricado, y en rosa corresponde a importancia.

Encuestados:		A		B		C		D		E		Prom.	Prom.	Imp.					
Aspectos Estructurales	Durabilidad del material	4	5	4	4	5	5	5	5			3	4	5	4,0	4,8	4,8		
	Resistencia mecánica	4	5	3	4	4	4		4	5	4		5	3	5	5	3,8	4,5	4,4
	Resistencia al fuego	4	5	3	3	5	4		4	5	4		5	3	4	5	3,5	4,5	4,4
	Deformaciones adecuadas	5	5	3	4	3	4	1	1	4	4		5	3	5	5	3,4	3,5	4,2
	Comportamiento sísmico	5	3	5	4	4	5		4	5	5		5				4,7	3,7	5,0
	Interacción Suelo / Fundación	5	5	3	4	3	3	5	5	3	4		5	5	4	5	4,6	4,3	3,8
Aspectos constructivos	Facilidad de implementación	5	5	4	4	3	4	5	3	5	5		5	5	3	5	4,8	3,5	4,6
	Costos de obra*	3	5	5	4	4	5	5	3	5	5		5	5	4	5	4,4	4,0	5,0
	Costos de mantenimiento*	4	5	4	3	4	3	3	4	4	4		5	3	4	5	3,4	4,3	4,2
	Factibilidad de construcción	5	5	3	4	4	4	5	5	5	5		5	4	4	5	4,6	4,5	4,4
Otros aspectos	Confiabilidad del material	5	5	3	4	4	5	5	3	3	5		5	5	4	5	4,8	4,0	4,2
	Huella de carbono*	5	3	3	5	2	4	5	1	3	5		5	5	3	5	5,0	2,3	4,0
	Comportamiento térmico	3	3	3	5	3	5	5	1	3	5		5	5	2	5	4,6	2,3	4,2
Evaluación final = IMPACTO*PROMEDIO												19	17						