



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

DISEÑO DE ENTREPISOS PARA EDIFICIOS HABITACIONALES DE MADERA Y DE
CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

JUAN PABLO FIERRO CARRASCO

PROFESOR GUÍA:
SALVADOR CORREA EYZAGUIRRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARIO WAGNER MUÑOZ
DAVID CAMPUSANO BROWN

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por E2E S.A.

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: JUAN PABLO FIERRO CARRASCO
FECHA: 2020
PROF. GUÍA: SALVADOR CORREA EYZAGUIRRE

DISEÑO DE ENTREPISOS PARA EDIFICIOS HABITACIONALES DE MADERA Y DE CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA EN CHILE

La construcción de edificios de madera en Chile necesita investigación y nuevas soluciones para poder masificarse, pues a pesar de los grandes beneficios que puede presentar para el país, es un material no considerado hasta hace pocos años para la construcción de edificios. El presente trabajo de título tiene como objetivo desarrollar, diseñar y validar un sistema de entrepiso de madera para edificios habitacionales, construidos de forma industrializada en Chile. Así, el diseño pretende ser una solución viable y conveniente desde el punto de vista estructural, de habitabilidad y de la construcción industrializada. Para ello, se definen varias restricciones que delimitan un marco dentro del cual se hace el diseño.

La primera de las restricciones que se analiza es lo que el mercado inmobiliario necesita de un entrepiso en términos de las dimensiones. Principalmente, en cuanto a las luces que debe cubrir el elemento. Luego, se establecen las restricciones dadas por los materiales disponibles en el mercado chileno, tanto en las dimensiones como en la calidad de estos. Se determinan también las restricciones técnicas a considerar para tener un elemento que cumpla con toda la normativa correspondiente. Finalmente, se consideran restricciones y condiciones que permiten considerar el sistema diseñado como industrializado, no solo en el diseño, sino que también en la manipulación y transporte del elemento. A partir de ello se diseña un elemento de entrepiso que se construye y luego se somete a ensayos acústicos, para así validarlo como solución constructiva.

El diseño consiste en una estructura de vigas y cadenas de 2x8 pulgadas (185x41 *mm*), con tableros estructurales de OSB de 15,1 *mm* por arriba y por abajo, fijados de tal manera que actúan de manera colaborante. Entre las vigas y cadenas, 160 *mm* de lana de vidrio de 11 *kg/m*³. Sobre el tablero estructural superior, una membrana de caucho de 5 *mm* de espesor y 800 *kg/m*³ y como capa superior, un tablero no estructural de OSB, también de 15,1 *mm*. Por debajo del tablero estructural inferior, separadores de 1 pulgada de espesor, que reciben las dos capas de yeso cartón RF de 15 *mm*, que son el cielo que queda a la vista desde el piso inferior.

De los ensayos necesarios para la validación del elemento frente a la normativa chilena, se realizaron los ensayos acústicos, quedando pendiente el ensayo de resistencia al fuego. Así, se obtiene como resultado un sistema de entrepiso con niveles de reducción acústica ponderada de 46 dB y nivel de presión acústica de impacto normalizado de 66 dB. Esto demuestra que en términos de las exigencias acústicas de la normativa vigente, el sistema diseñado es utilizable como entrepiso en edificios habitacionales, presentando un aporte a la industria nacional de construcción en madera, como potencial sistema a utilizar en la construcción de edificios de dicho material.

Agradecimientos

Comienzo por agradecer a mi padres, quienes han sido para mi el mejor ejemplo a seguir en mi formación personal. Su bondad, inteligencia y constante preocupación, me han permitido crecer con todo el soporte que una persona podría desear, han alimentado mi deseo de superación personal y de ser siempre un aporte a la sociedad y a este mundo donde nos tocó vivir.

A mis hermanos, Nicolás y Felipe, por estar siempre ahí para escuchar mis ideas al otro lado de la mesa o al otro lado de la pantalla, por ser siempre una distracción entretenida con sus datos freak y en definitiva por ser mis compañeros de crecimiento. Agradezco también a mi abuelo, el Tata, otro ejemplo a seguir con su simpleza y buena voluntad aparentemente interminable. Siempre mostrando una buena cara, junto con el Caco me entregaron un espacio de cuidado y tranquilidad que compartí con ellos la mayor parte de mi vida universitaria y me permitió llegar hasta este punto.

A la Isi, mi gran compañera de vida que me motiva a ser lo mejor de mí. Gracias por ser incondicional, acompañar en malos momentos y celebrar todo lo celebrable, por tu alegría que hizo tanto más llevaderas las incontables e interminables tardes de estudio y en especial por todas las veces que una conversación echa nuestras mentes a volar, haciéndonos crecer juntos y descubriendo los propósitos que le dan sentido a todos los esfuerzos.

A mis amigos que me dejó el paso por la universidad, la querida Crew que de seguro va a estar el resto de la vida para seguir compartiendo una buena conversación y algo más, mención especial al Pancho, con quien además de sufrir la mayoría de los ramos, nos tocó sufrir juntos otro tanto y celebrar de vez en cuando en el estadio. A mis amigos que vienen desde el colegio y con quienes he seguido creciendo.

Agradezco a los buenos profesores, auxiliares de laboratorio y a todos los funcionarios del Departamento de Ingeniería Civil que fomentan el interés en aprender de forma responsable y con noción del rol que debemos tener los ingenieros en la sociedad.

A todas las personas de la empresa E2E que participaron de este proyecto, al área de ingeniería, bodega, operaciones, recepción, y a los trabajadores de la fábrica, por confiar y apoyarme a lo largo del proyecto.

A todos quienes estuvieron en algún momento para acompañar mi camino durante esta etapa.

Tabla de Contenido

Índice de Tablas	vii
Índice de Ilustraciones	viii
1. Introducción	1
1.1. Objetivos generales	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Metodología y alcances	2
1.4. Resultados esperados	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Contexto	5
2.1.1. Madera	5
2.1.2. Industrialización de la construcción	7
2.2. Normativa	8
2.2.1. Fuego	9
2.2.2. Acústica	10
2.2.3. Térmica	11
2.2.4. Estructural	11
2.3. Diseño del elemento	12
2.3.1. Diseño acústico	12
2.3.2. Diseño contra fuego	13
2.3.3. Diseño estructural	14
3. Restricciones y Supuestos Para el Diseño	15
3.1. Restricciones de dimensiones en el mercado inmobiliario chileno	15
3.1.1. Análisis de planos publicados por inmobiliarias	15
3.1.2. Información recopilada de entrevistas	16
3.1.3. Caso de viviendas sociales	18
3.1.4. Conclusiones acerca de las dimensiones	18
3.2. Construcción industrializada	19
3.3. Materiales disponibles para entrepisos de madera en Chile	20
3.3.1. Madera aserrada	20
3.3.2. Tableros OSB	21
3.4. Análisis normativo	21
3.4.1. Ordenanza general de urbanismo y construcciones (O.G.U.C.)	21
3.4.2. Normativa estructural chilena	26

3.4.3.	Normativa estructural europea	38
3.4.4.	Normativa para cálculo térmico	41
4.	Diseño del Elemento de Entrepiso	44
4.1.	Descripción física	44
4.1.1.	Composición del sistema	44
4.2.	Factores de modificación y tensiones de diseño	50
4.3.	Cargas y solicitaciones	51
4.4.	Inercia y rigidez del sistema	52
4.4.1.	Clasificación de diafragma	53
4.5.	Verificaciones de diseño	54
4.5.1.	Verificación de resistencia	54
4.5.2.	Verificación de deformaciones	57
4.5.3.	Verificación de vibraciones	57
4.5.4.	Verificación de resistencia en izaje	58
4.5.5.	Verificación térmica	60
4.6.	Secuencia de armado	61
4.7.	Estudio de costos	63
5.	Probeta y Ensayo	65
5.1.	Construcción de la probeta	65
5.2.	Manipulación y transporte	70
5.3.	Ensayo acústico	70
6.	Resultados Ensayo	75
	Conclusión	76
	Bibliografía	80
	A. Sistema utilizado en Torre Peñuelas	82
	B. Detalle de departamentos analizados	83
	C. Zonificación térmica de Chile	85
	D. Tablas de propiedades fisicomecánicas tableros OSB	101
	E. Fichas técnicas para determinación de pesos propios de materiales	102
	F. Informe ensayo acústico emitido por Laboratorio CPIA	103

Índice de Tablas

2.1. Resistencias al fuego requeridas según O.G.U.C.	9
2.2. Exigencias térmicas O.G.U.C. para pisos ventilados y techumbres	11
3.1. Luces máximas por cubrir en departamentos analizados	16
3.2. Luces por cubrir en departamentos analizados con vigas propuestas	17
3.3. Resistencia al fuego requerida para los elementos de construcción de edificios	24
3.4. Categorización de edificios habitacionales	24
3.5. Tensiones admisibles de Pino Radiata, (MPa)	27
3.6. Transmitancias máximas exigidas por la O.G.U.C. (W/m^2K)	42
4.1. Propiedades tableros OSB, según catálogos de LP	48
4.2. Propiedades calculadas de tableros OSB, según catálogos de LP	48
4.3. Propiedades de tableros OSB, según DIN 1052-2004	48
4.4. Propiedades de tableros OSB consideradas para el cálculo	48
4.5. Factores de modificación considerados para madera aserrada	51
4.6. Tensiones de diseño calculadas para madera aserrada grado C24	51
4.7. Cargas de diseño	51
4.8. Colaboración de tableros estructurales en inercia y rigidez por ancho unitario	52
4.9. Verificación de resistencias en condiciones de uso	55
4.10. Capacidad de carga de clavos	56
4.11. Deformaciones admisibles y calculadas	57
4.12. Verificación de resistencias en condición de izaje	59
4.13. Conductividades y resistencias térmicas de materiales	60
4.14. Resistencias y transmitancias térmicas del sistema	61
4.15. Costos de materiales	63
6.1. Resultados de ensayo y exigencias acústicas	75
B.1. Detalle de los departamentos analizados para determinar luces de diseño . . .	83

Índice de Ilustraciones

3.1. Esquema de viga compuesta, NCh 1198	30
3.2. Esquema de ancho colaborante de tableros	34
3.3. Especificación de fijaciones a utilizar para tableros de OSB, Catálogo técnico tableros OSB certificado APA	35
3.4. Modos de fluencia de elementos de fijación mecánica tipo cilíndrico en cizalle simple, NCh 1198	35
3.5. Parámetros para calcular carga admisible de tornillos, NCh 1198	37
3.6. Parámetros a y b para cálculo de vibraciones, EN 1995-1-1	40
4.1. Módulo del sistema	45
4.2. Vista en planta de plano de módulo diseñado	45
4.3. Corte de plano de módulo diseñado	46
4.4. Esquema de tableros clavados a viga	56
4.5. Diagrama de momento en condición de izaje	59
5.1. Vista en planta de módulo para ensayo, ancho original	66
5.2. Vista en planta módulo para ensayo, ancho adaptado	66
5.3. Estructura de módulo de ensayo	67
5.4. Plancha de OSB estructural inferior y separadores	68
5.5. Material aislante	69
5.6. Parte superior del módulo	70
5.7. Descarga del camión en el laboratorio	71
5.8. Sala receptora y marco para la probeta	71
5.9. Plano del laboratorio, informe de ensayo	72
5.10. Etapas de colocación de la probeta	72
5.11. Sellos para la probeta	73
5.12. Fuentes de sonido ensayo ruido aéreo	73
5.13. Ubicación del sonómetro en ensayos	74
5.14. Fuente de impactos en ensayo de impacto	74
A.1. Sistema utilizado en la Torre Experimental Peñuelas	82
C.1. Zonificación térmica Región de Tarapacá, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	85
C.2. Zonificación térmica Región de Antofagasta, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	86

C.3. Zonificación térmica Región de Atacama, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	87
C.4. Zonificación térmica Región de Coquimbo, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	88
C.5. Zonificación térmica Región de Valparaíso, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	89
C.6. Zonificación térmica Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	90
C.7. Zonificación térmica Región del Maule, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	91
C.8. Zonificación térmica Región del Bío-Bío, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	92
C.9. Zonificación térmica Región de La Araucanía, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	93
C.10. Zonificación térmica Región de Los Lagos, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	94
C.11. Zonificación térmica Región de Aisén del General Carlos Ibáñez del Campo, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	95
C.12. Zonificación térmica Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	96
C.13. Zonificación térmica Región Metropolitana de Santiago (a), Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	97
C.14. Zonificación térmica Región Metropolitana de Santiago (b), Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	98
C.15. Zonificación térmica Región de Los Ríos, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	99
C.16. Zonificación térmica Región de Arica y Parinacota, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU	100
D.1. Propiedades de tableros OSB, Catálogo técnico tableros OSB certificados APA	101
E.1. Tabla de dimensiones y pesos de yeso-cartón, ficha técnica Pizarreño	102
E.2. Tabla de dimensiones y pesos de OSB, Catálogo técnico tableros OSB certificados APA	102

Capítulo 1

Introducción

La construcción de edificios de madera en Chile se encuentra todavía en una etapa inicial, aún no es un tipo de construcción muy considerado por las empresas constructoras ni inmobiliarias. Sin embargo, existen razones para pensar que este tipo de estructuras va a comenzar a ser más requerida en los próximos años [10]. Si se mira hacia otros países la situación es distinta, pues especialmente en los países norteamericanos (EEUU y Canadá), Australia, Nueva Zelanda y los más nórdicos de Europa, la construcción en madera representa un alto porcentaje de la industria. Además, en los últimos años ha habido una tendencia a elevar la altura de los edificios de madera, construyéndose uno de hasta 85 metros de altura, por ejemplo, en Noruega. Claramente las condiciones para la construcción en madera no son las mismas en todos los países y es por ello que para que en Chile se desarrolle con la misma fuerza, se requiere de un desarrollo propio que tome en cuenta las condiciones y necesidades locales.

Considerando que Chile es un país productor de madera, sería conveniente utilizarla de forma masiva como material de construcción. Los recursos y condiciones para ello están disponibles, sin embargo, muchas veces por falta de costumbre y/o desconocimiento del material, este no es considerado y la mayor parte de la madera que se produce como material estructural, termina siendo exportada a países que sí la utilizan en sus construcciones. Esto toma más importancia si se piensa en la amplia presencia de madera en el sur de Chile, que puede presentar una situación muy favorable para solucionar los problemas de déficit habitacional que existe en las regiones australes del país [14], donde muchas veces es complicado construir con hormigón por la ausencia de plantas premezcladoras en la zona y lo alejado de muchas localidades.

Así, repensar la forma en que se construirán los edificios del futuro, potenciando la construcción en madera, presenta una alternativa sustentable en comparación con las construcciones tradicionales, para densificar la población en zonas con mejor acceso a servicios básicos [17]. Algo similar se aborda en el manifiesto de las industrias madereras europeas para el periodo 2019 – 2024, donde destacan los sistemas constructivos modernos de madera como una solución sustentable para la crisis de vivienda de la unión europea, que se podría considerar como referencia para el caso chileno.

Además, al ser un material ideal para trabajar con prefabricación y de forma industrializada, se debe aprovechar el incipiente mundo del Building Information Modelling (BIM) para potenciar aún más la capacidad de construir edificios de madera con un menor costo que los materiales más tradicionales, sin comprometer la calidad. Si se logra hacer esto, se podría tener una industria que desde su origen utilice los conceptos de integración y trabajo en conjunto que propone BIM, presentando esto una ventaja con respecto a la industria de la construcción en hormigón y acero. [19]

La necesidad de soluciones estructurales para masificar la construcción en madera es la motivación central de este trabajo de título. En particular, se abordará la situación de los elementos de entrepiso de madera. Por otro lado, la industrialización también presenta un foco de interés para este trabajo, pues se quiere aprovechar la facilidad con la que se puede industrializar la construcción en madera como una herramienta más para la masificación de la misma.

1.1. Objetivos generales

Este trabajo de título tiene como objetivo general, diseñar una solución de entresijos económicamente competitivos, en línea con los requerimientos arquitectónicos del mercado inmobiliario chileno, utilizable en edificios habitacionales de madera, construidos de forma industrializada en Chile.

1.2. Objetivos específicos

1. Definir las restricciones que impone el mercado inmobiliario chileno, desde el punto de vista de las dimensiones (luzes y espesores), condiciones de habitabilidad y confort de los clientes.
2. Definir las condiciones bajo las cuales se considerará la construcción industrializada.
3. Conocer las características de las vigas y tableros de madera disponibles en Chile para la construcción.
4. Diseñar, verificar, construir y validar el sistema a través de una probeta que cumpla analíticamente con todos los requerimientos vigentes para entresijos de madera en edificios habitacionales.

1.3. Metodología y alcances

1. Definición de los requerimientos del mercado inmobiliario:

Análisis de planos de departamentos publicados por inmobiliarias para tener un primer acercamiento a los rangos de dimensiones que se manejan en los departamentos del mercado chileno. Esto se complementa con entrevistas a arquitectos de inmobiliarias y otros arquitectos con experiencia, dedicados a la construcción de edificios habitacionales

para tener un rango de luces y otras condiciones a satisfacer para que una solución de entepiso sea utilizable en el mercado.

2. **Definición de construcción industrializada:**

Entrevistas con profesionales de empresas que trabajan de forma industrializada y otras instituciones ligadas a la industrialización de la construcción, para así determinar cuáles son las restricciones que le permiten a una solución ser considerada como industrializada y tener un buen rendimiento como tal.

3. **Definición de requerimientos técnicos y de seguridad:**

Análisis de normativa nacional para las condiciones de habitabilidad a cumplir (Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones) y entrevistas con expertos en temas de fuego y acústico para tener todas las herramientas necesarias para un diseño óptimo. Desde el punto de vista estructural, un análisis de las normas chilenas que mencionan a continuación, para establecer con claridad todo lo que se considera en el diseño.

- NCh1198 Madera - Construcciones en madera - Cálculo.
- NCh1537 Diseño estructural - Cargas permanentes y cargas de uso.

Además, se considera la verificación de vibraciones incluida en la norma europea *Eurocode 5: Design of Timber Structures*, pues es de vital importancia asegurar las mejores condiciones de confort normadas, para que el sistema pueda utilizarse en el mercado habitacional chileno.

4. **Revisión de materiales:**

Estudio de los catálogos de proveedores de materia prima para conocer las características de los elementos con los que se puede diseñar. Se complementa el estudio con entrevistas a profesionales de las empresas proveedoras para saber, en los casos más críticos (como las vigas) y cuando la información disponible no sea suficiente, qué características son factibles de considerar para diseñar en Chile.

5. **Diseño del elemento:**

Diseño en base a toda la información recopilada:

- Normativa estructural nacional y europea.
- Normativa de habitabilidad.
- Conceptos sobre fuego y acústica de expertos.
- Conceptos de industrialización y materiales disponibles.
- Restricciones de arquitectura.

6. **Construcción y ensayo de probeta:**

Construcción de la probeta en la planta de la empresa E2E y ensayos acústicos, en un laboratorio acreditado para validar oficialmente el cumplimiento de las restricciones acústicas del sistema.

1.4. **Resultados esperados**

Se espera con este trabajo identificar las restricciones impuestas por el mercado de los edificios habitacionales en cuanto a las dimensiones, para los elementos estructurales de entepiso,

principalmente en cuanto a las luces que debe cubrir según lo que requiere la arquitectura de los proyectos.

Además, definir las condiciones que determinan que la solución desarrollada se considere como industrializada y los requerimientos, tanto técnicos como de seguridad y habitabilidad que debe cumplir un sistema de entrepiso de madera.

Finalmente, desarrollar analíticamente una solución de entrepiso para edificios de madera que sea utilizable en edificios habitacionales construidos en Chile y certificar el cumplimiento de restricciones acústicas a través de ensayos.

Capítulo 2

Marco Teórico

Para entender las motivaciones de este trabajo de título, el estado del arte de los temas a abordar, tanto en Chile como a nivel mundial, y los puntos de partida para llevar a cabo el diseño del elemento propuesto, se presenta a continuación una revisión de la bibliografía pertinente. En ella se explica primero la importancia de la construcción con madera y la industrialización de la construcción, ambos temas abordados en el trabajo de título. Luego se hace una revisión preliminar de la normativa que impone restricciones y requisitos al elemento a diseñar. Por último se hace una revisión preliminar de los conceptos que se aplicarán en la fase de diseño del elemento.

2.1. Contexto

2.1.1. Madera

La madera ha sido utilizada desde siempre como material de construcción, pues al ser un material obtenido directamente de la naturaleza, ha estado en el entorno y a la mano del ser humano desde el comienzo de su existencia. La estrecha relación que se establece entre el desarrollo del ser humano y la madera es expuesta en una serie de publicaciones de la revista de la asociación de investigación de las industrias de la madera en España (AITIM) por los arquitectos Justo García Navarro y Eduardo de la Peña Pareja. Allí hacen un recorrido por la historia de la construcción en madera y de la utilización de la misma para la elaboración de múltiples herramientas.

Es de común conocimiento que este material ha sido históricamente muy utilizado en construcción, especialmente cuando lo que primaba eran las construcciones de viviendas unifamiliares. Sin embargo, las necesidades de vivienda en ciudades y de las personas que las componían cambiaron a lo largo del tiempo. Es así como después de la revolución industrial, la madera fue desplazada de entre los materiales de construcción más utilizados [2]. Fue una época en la que la población mundial comenzó a aumentar como nunca antes y las ciudades debieron densificarse, obligando a los edificios a aumentar de tamaño. Dadas las condicio-

nes de la tecnología de los materiales en ese momento, aquellos que tomaron la delantera en términos de uso fueron el hormigón y el acero, pues presentaban características más favorables para la construcción. Resistencias mucho mayores, un conocimiento más acabado de su funcionamiento y caracterizaciones más precisas de su comportamiento fueron razones suficientes para ser considerados desde ese momento como los materiales más importantes para los edificios en altura a nivel mundial [8].

Hoy en día el panorama es distinto, pues motivados principalmente por disminuir los efectos de la industria de la construcción sobre el medio ambiente, múltiples especialistas se han abocado a aumentar y mejorar el conocimiento que se tiene sobre la madera como material de construcción. Por ejemplo, en múltiples estudios, como la tesis de postulación al grado de magíster del arquitecto Vittorio Salvadori, la principal motivación tiene que ver con fomentar la construcción de edificios de altura en madera, debido a dos grandes problemáticas muy asociadas entre sí. Primero, la construcción de viviendas urbanas para tres mil millones de personas dentro de los próximos 30 años, y segundo, el cambio climático.

Lo preocupante de esto es que a la industria de la construcción se le adjudica cerca del 50 % de la emisión de gases de efecto invernadero, entre la construcción y la operación de las distintas obras y estructuras. Más específicamente, solo entre la producción de hormigón y acero, se estima que emiten el 8 % de los gases de efecto invernadero a nivel mundial, pues son materiales que requieren de mucha energía en su proceso productivo [17]. Considerando entonces la gran problemática que será proveer de vivienda a tanta gente en las próximas décadas y el ya conocido problema del calentamiento global, la madera aparece como un material a considerar.

Para ilustrar esto, se puede recurrir a un caso particular analizado por el Consejo de la Madera Canadiense (*Canadian Wood Council*), que corresponde a la comparación, entre otros efectos, de la “energía almacenada” por tres viviendas unifamiliares de igual diseño arquitectónico, pero construidas en acero, hormigón y madera respectivamente. Se entiende por energía almacenada la suma de la energía requerida para extraer, procesar, transportar, construir y mantener los materiales utilizados en una obra. Del estudio se desprende que el acero y el hormigón almacenan un 26 % y 57 % respectivamente más de energía que la misma vivienda en madera, emiten 34 % y 81 % más de gases de efecto invernadero y que descargan 400 % y 350 % más de contaminación hídrica [4].

Para entender y mostrar cómo ha cambiado la tecnología de la madera para la construcción de edificios en altura, el arquitecto Michael Greene escribió el libro “*The Case for Tall Wood Buildings*”, una especie de cruzada en defensa de los grandes edificios en madera. Allí explica que para avanzar en los edificios de madera, ha sido esencial la investigación y desarrollo tecnológico de la madera como material de construcción, pues al ser un material de la naturaleza, tiene características muy distintas a las de otros materiales. De hecho, se suele decir que la madera es como los copos de nieve, pues no existen dos árboles, ni dos vigas de madera, exactamente iguales. A pesar de ello, gracias a distintas metodologías, se han logrado caracterizar las propiedades mecánicas de la madera, permitiéndose el cálculo y diseño de elementos estructurales con el respaldo de distintas normativas. Además, materialidades como la madera laminada encolada y tableros de fibra de madera, han ampliado las posibilidades de soluciones utilizando elementos de madera, permitiendo el desarrollo de muchos proyectos

(algunos ya construidos y otros en construcción) de hasta 30 pisos de altura. [9]

Si bien en varios países la construcción en altura con madera lleva ya varios años de avances, investigación y práctica, en Chile es todavía una industria que está comenzando. Prueba de ello por ejemplo, es el edificio “Torre Experimental Peñuelas” ubicado en la reserva nacional Lago Peñuelas, entre Santiago y Valparaíso, construido por el Centro de Innovación de la Madera de la Pontificia Universidad Católica de Chile (CIM-UC), que desde noviembre de 2018 está monitoreando su comportamiento para así ir validando o descartando distintas soluciones para un edificio en altura construido en madera. Del mismo modo se deben considerar los esfuerzos de IDIEM, que está liderando la elaboración de una normativa para madera expuesta al fuego y lo que se está haciendo en la Universidad del Bío-Bío por avanzar en una normativa sísmica para madera.

Así entonces, se observa en la construcción de edificios en altura con madera en Chile una necesidad importante de investigación e innovación. Como se mencionó anteriormente, hay múltiples esfuerzos por estudiar de forma global los edificios y sistemas constructivos, pero también es necesario estudiar los elementos estructurales de forma individual. Este trabajo de título tiene ese objetivo y en particular, se enfoca en los elementos estructurales de entrepiso. Si se observa por ejemplo el caso de la ya mencionada “Torre Experimental Peñuelas”, el elemento de entrepisos que allí se utilizó consiste, a grandes rasgos, en un envidado de madera aserrada, tableros de protección (yeso-cartón y madera contrachapada) por arriba y por abajo, pero con una sobrelosa de hormigón de 4 cm encima de todo, como se muestra más detalladamente en la figura A.1 incluida en el apéndice del presente informe. Si bien este sistema permitiría disminuir de forma muy considerable el uso de hormigón en la construcción (pues se pasaría de las losas comunes de 14 o 15 cm de hormigón a una sobrelosa de 4 cm), solucionando en parte uno de los problemas de contaminación mencionado anteriormente, limitaría mucho la parte de industrialización de la construcción, que es el otro gran tema que busca abarcar este trabajo de título.

2.1.2. Industrialización de la construcción

Así como la madera es un material que 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. Lógicamente, las empresas de construcción siempre buscan disminuir al mínimo sus costos y plazos de obras, por lo que es natural que las prácticas y los sistemas constructivos vayan variando con los años hacia metodologías más convenientes. En esa búsqueda, ya hay varias empresas chilenas que se han dedicado a trabajar de forma industrializada y que están incursionando en diferentes tipos de obras construidas con elementos prefabricados. Además, está siendo un concepto fomentado por iniciativas gubernamentales como construye 2025, que buscan modernizar la construcción en Chile, alcanzando prácticas más sustentables y eficientes [18].

Esto debe ser visto con buenos ojos por la industria de la construcción en madera, pues se trata de un material muy favorable para la prefabricación [19]. Se puede adaptar fácilmente a medidas estándar y es fácil de manipular y trasladar dado su bajo peso. Además, los avances en las modelaciones 3D, BIM (building information modelling) y maquinaria CNC

(control numérico computarizado), hacen la prefabricación todavía más fácil y conveniente. Otro beneficio de la construcción industrializada, es que permite pasar gran parte de la construcción, de trabajo en terreno a trabajo en fábrica, teniendo así condiciones mucho más seguras y controladas.

A nivel internacional esto es algo que también se está impulsando e instituciones como el *American Wood Council* publican boletines con el objetivo de fomentar tanto la industrialización como la construcción en madera. Allí explican que entre los beneficios que esto tiene, se encuentran la eficiencia de los procesos en todas sus etapas, pues 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, que es donde se producen las mayores incertidumbres. Los ambientes controlados de fabricación aumentan la calidad y precisión de los componentes; como se dijo anteriormente, aumenta la seguridad de los trabajadores y minimiza el efecto del clima sobre los tiempos de la obra. Aumenta así la eficiencia en el uso de los materiales y disminuye la generación de residuos en la construcción, avanzando de esta forma también, hacia una construcción más sustentable. Todo lo ya mencionado ayuda a tener presupuestos más controlados y aunque si se analiza solo la materialidad, los elementos prefabricados suelen ser más caros, los ahorros en los trabajos en terreno deberían permitir disminuir los costos totales de la obra.

Aseguran eso si los investigadores Stefan Winter, Markus Lechner y Claudia Köhler, de la Universidad Técnica de Múnich, en su publicación “*Industrialization of Building Processes – a chance for timber to take the lead*”, presentada en la Conferencia Mundial de Ingeniería y Madera del 2018, que se debe evitar caer en los errores clásicos de la construcción industrializada, como lo puede ser el asumir que la industrialización implica la provisión de todos los elementos de una única fuente. Explican que para que esto se logre, las inversiones necesarias son muchas veces demasiado grandes, restringiendo el ingreso a la industria de muchos competidores. Así entonces, recomiendan avanzar hacia una industria donde cada fabricante se dedique a un tipo de elemento que componen una estructura, para que así entre varios se logre completar un sistema complejo como un edificio. [19]

Bajo esa premisa toma todavía más valor el proyecto de este trabajo de título, que se enfoca en un elemento en particular, como lo es el elemento de entrepiso, quedando claro que no solo el estudio de elementos de forma individual es útil, sino que también lo es la producción individual e independiente de elementos estructurales.

Es por las razones recién expuestas, que este trabajo de título no solo se enfoca en los elementos de entrepiso de madera, sino que también considera el desarrollo de un sistema que sea industrializable.

2.2. Normativa

Para construir edificios en Chile, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) impone requisitos a través de la Ley General de Construcciones y Urbanismo (LGUC), que a su vez, se aplica a través de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). En

este documento, se explicitan por ejemplo las normas que deben cumplir los proyectos, pero también se detallan muchos requisitos que no tienen normativa propia y que son igualmente importantes, como las resistencias que deben tener los elementos estructurales al fuego, la aislación térmica o la aislación acústica. Además, en el mismo documento se catalogan los edificios, dejando claramente estipulado lo que se exige para cada edificio y sus elementos (estructurales y no estructurales) de acuerdo a su naturaleza y características. Tomando esto último en consideración, los requisitos que se consideran en este estudio son los de fuego, acústicos y térmicos, pues requisitos de fuego y acústicos se exigen para elementos de entrepiso (o losas) en edificios habitacionales, dada la característica de divisorio entre unidades de vivienda que tienen estos elementos, mientras que las exigencias térmicas se consideran si es que el sistema se utiliza como piso ventilado o como techumbre.

2.2.1. Fuego

En la O.G.U.C. se exige una cierta resistencia al fuego (RF) de los elementos de un edificio dependiendo de la categoría del mismo. En particular, los edificios habitacionales se catalogan según el número de pisos que tengan, en edificios tipo “d” (1 – 2 pisos), tipo “c” (3 – 4 pisos), tipo “b” (5 pisos) o tipo “a” (6 o más pisos). Así, se indica después la resistencia exigida a cada tipo de elemento (elemento resistente vertical, elemento resistente horizontal, muro cortafuego, elemento divisorio entre unidades, etc). Es así como se puede conocer la resistencia al fuego que exige la normativa chilena a través de la O.G.U.C. a todo tipo de elementos y en particular, a los elementos de entrepiso (elementos soportantes horizontales), que son los elementos estudiados en este proyecto. En tabla 2.1 se resumen las resistencias al fuego que se exigen para un elemento de entrepiso, según el número de pisos del edificio al que pertenece.

Tabla 2.1: Resistencias al fuego requeridas según O.G.U.C.

Nº de pisos	1 - 2	3 - 4	5	6 o más
RF requerida	F-30	F-60	F-90	F-120

Vale aclarar que la resistencia al fuego se expresa en minutos. Cuando se dice que un elemento debe tener una resistencia al fuego de F-“N”, significa que se debe garantizar que por al menos “N” minutos, el elemento resista la exposición al fuego. Donde a su vez, la definición de resistencia al fuego puede ser distinta dependiendo del elemento que se esté analizando, pero básicamente consiste en que luego de los “N” minutos de exposición, el elemento siga siendo capaz de soportar las cargas a las cuales está siendo sometido.

Que estos requisitos aparezcan en la O.G.U.C, significa que para construir en Chile, es necesario acreditar previamente el cumplimiento de los elementos para recibir los permisos de edificación. En el caso de la resistencia al fuego, esto se puede lograr de dos formas:

1. Existe un listado de soluciones oficiales aprobadas por el MINVU (Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción, 2014) que permite simplemente utilizar los sistemas que allí aparecen o en su defecto, asimilar esos sistemas a lo que se quiera utilizar. Para poder asimilar una nueva solución a algo

que ya está en el listado, se debe siempre tener un sistema más favorable que el que existe en el listado oficial, pero además, la asimilación debe estar acreditada y firmada por alguno de los laboratorios que hace los mismos ensayos.

2. En caso de que el sistema que se quiera utilizar no esté en el listado ni sea asimilable a ninguna solución que lo esté, la normativa actual no tiene otra alternativa que hacer ensayos que demuestren la resistencia exigida. Entonces, cualquier diseño nuevo (no asimilable a las soluciones actuales) que tenga como objetivo ser utilizable en edificios chilenos, debe ser sometida a ensayos de resistencia al fuego mediante procedimientos normados por la NCh 935/1 “Ensayo de resistencia al fuego – Elementos de construcción en general”, que acrediten que tiene la resistencia exigida por la O.G.U.C.

Esto es importante de mencionar y considerar para este proyecto, pues la solución que aquí se presenta, no es asimilable a ninguna solución del listado, por lo que si se quisiera utilizar, tendría que ser ensayada.

2.2.2. Acústica

Las exigencias acústicas especificadas en la O.G.U.C. son bastante más sencillas que aquellas sobre fuego, pues solo abarcan los elementos separadores entre unidades y no diferencian más que entre elementos verticales y horizontales. Es decir, las exigencias acústicas solo aplican para aquellos muros, losas y/o entrepisos que cumplan la función de separar dos viviendas. Así, en los elementos de entrepiso (divisorio de viviendas horizontal) las exigencias son para dos tipos de aislamiento acústico:

- Aislamiento de ruido aéreo, donde se debe asegurar que un elemento de entrepiso (y cualquier otro elemento divisorio entre unidades) aisle a lo menos 45 dB de ruido aéreo, denominado el índice de reducción acústica mínima.
- Aislamiento de ruido de impacto, donde se debe asegurar que un elemento de entrepiso no transmita una presión superior a 75 dB al impacto de un piso a otro, denominado como el nivel de presión acústica de impacto normalizado máximo.

La acreditación de que los elementos cumplen con las exigencias correspondientes de la O.G.U.C. es muy similar al caso del fuego. Para el caso acústico también existe un listado de soluciones que han sido aprobadas por el MINVU (Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Aislamiento Acústico, 2014) de acuerdo a ensayos, con las cuales se puede construir directamente.

Al igual que para el caso del fuego, en caso de que se quiera utilizar una nueva solución, se puede asimilar a alguna de las presentes en el listado. Si eso no es posible, se debe hacer la acreditación a través de ensayos normados por la NCh2785 “Acústica - Medición de aislación acústica en construcciones y elementos de construcción - Mediciones en terreno de la aislación” o la NCh2786 “Acústica - Medición de aislación acústica en construcciones y elementos de construcción - Mediciones en laboratorio de la aislación” dependiendo de si el elemento ya está construido en terreno o si todavía se puede construir una probeta previa a la instalación definitiva.

2.2.3. Térmica

En cuanto a las exigencias térmicas, la O.G.U.C. solo exige niveles de aislación térmica a través de la transmitancia máxima (U) o resistencia total mínima (R_t) a los elementos de la envolvente de un edificio. Es decir, los entrepisos que actúan como separadores entre unidades no están incluidos entre de las restricciones, pues se considera que dentro del edificio, el sistema completo es adiabático.

Así, las exigencias sí están para los pisos ventilados y techumbres, elementos que podrían ser materializados con los entrepisos diseñados, por lo que se consideran en el análisis. En la tabla 2.2 se muestran las exigencias impuestas por la O.G.U.C, separadas por zona térmica, división que se puede observar en las figuras C.1 a C.16 del apéndice del informe.

Tabla 2.2: Exigencias térmicas O.G.U.C. para pisos ventilados y techumbres

Zona	Pisos ventilados		Techumbre	
	U máx. (W/m^2k)	R_t mín. (m^2k/W)	U máx. (W/m^2k)	R_t mín. (m^2k/W)
1	3,60	0,28	0,84	1,19
2	0,87	1,15	0,60	1,67
3	0,70	1,43	0,47	2,13
4	0,60	1,67	0,38	2,63
5	0,50	2,00	0,33	3,03
6	0,39	2,56	0,28	3,57
7	0,32	3,13	0,25	4,00

2.2.4. Estructural

Al construir con madera en Chile, la normativa a considerar para los cálculos estructurales es la NCh1198: Madera - Construcciones de Madera – Cálculo. En esta norma se encuentran datos como las tensiones admisibles, módulos de elasticidad o factores de modificación, además de la explicación para la utilización de estos. Hablando específicamente del diseño, se aborda en esta norma el dimensionamiento de piezas estructurales de madera aserrada y de elementos compuestos por más de una pieza, sometidos a flexión, compresión paralela, tracción paralela, compresión normal a la fibra y esfuerzos combinados. Además, se explican los procedimientos para dimensionar piezas de madera laminada encolada (aunque las tensiones admisibles para estos elementos se encuentran en la NCh2165 “Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata”) sometidas a flexión y compresión paralela. El procedimiento para diseñar las uniones entre elementos de madera también está en la norma, explicando según tipo de conector, factores de modificación y medidas de protección.

Para lo que le concierne a este trabajo en particular, se va a considerar el diseño a flexión de elementos que se encuentra en la NCh1198, pues el entrepiso consiste en un sistema de vigas sometidas justamente a flexión. En ese sentido se deberá considerar de la misma norma las deformaciones máximas permitidas para este tipo de elementos, además de las verificaciones de resistencia.

A diferencia de la normativa para la construcción en madera de otros países, se observa que la normativa chilena no considera un tema de gran interés para el éxito de un sistema de entrepiso, como lo es el control de vibraciones. Esto regula y limita las frecuencias naturales que puede tener un sistema de entrepiso de madera para estar fuera del rango de frecuencias molestas para el ser humano y generadas por las actividades normales en una vivienda. Así se evita que el entrepiso vaya a entrar en resonancia y genere incomodidad en los usuarios. Se sigue para ello el modelo de control de vibraciones expuesto en la norma europea para la construcción en madera, *Eurocode 5: Design of Timber Structures*.

Por último, es necesario trabajar con los estados de carga especificados en la normativa chilena, dados en la NCh1537: Diseño estructural – Cargas permanentes y cargas de uso. De allí se toman las cargas y combinaciones de carga que corresponden a edificios habitacionales.

2.3. Diseño del elemento

Explicado ya el contexto y la motivación del presente trabajo de título, se explican a continuación algunos supuestos y criterios a considerar para el desarrollo de un diseño acorde a las restricciones normativas expuestas. Además, si bien se deben hacer ensayos para validar oficialmente la solución propuesta, se desarrolla un análisis teórico del comportamiento acústico, frente al fuego, térmico y estructural de la solución propuesta.

2.3.1. Diseño acústico

Existe una sólida teoría detrás del estudio acústico de elementos de construcción que se demuestra claramente, por ejemplo, en la existencia de la carrera universitaria de Ingeniería Acústica. El presente trabajo de título toma herramientas de esta disciplina para llegar a un diseño que cumpla con los requerimientos acústicos antes de pasar a la fase de ensayos.

Hay que considerar eso sí que la teoría de cálculo de reducción sonora, está especialmente concentrada en elementos macizos y no en elementos compuestos por entramados y varias capas, como lo es la propuesta de este trabajo de título. Para este tipo de elementos, los mejores análisis fallan en magnitudes de hasta 8 dB, por lo que no resulta factible llegar a un valor predictivo confiable. Es por eso que para abordar estos casos más complejos que no cuentan con fórmulas analíticas muy aceptadas entre los especialistas, se recurre también a la experiencia de los mismos especialistas y a métodos de análisis aproximados basados en resultados de elementos ya ensayados.

De esta forma, se conoce que a priori, los factores principales en el comportamiento acústico son la masa y la configuración o forma de disponer de los materiales que componen el elemento. Dado que lo que se busca es un elemento de madera prefabricado, el tema de la masa es algo que juega en contra, pues ni la madera es un material de mucha masa, ni es conveniente para la prefabricación tener elementos muy pesados. Es por ello que lo más importante en cuanto a la parte acústica en la fase de diseño, es la composición del elemento mismo.

Bajo la lógica recién mencionada, el diseño busca tener un sistema que tenga varias capas y variaciones de densidades entre dichas capas, esto con la idea de que la vibración que produce el sonido, no tenga un camino directo entre un lado y otro del entrepiso. Así, se va a recurrir a capas de materiales distintos a la madera, para aportar algo más de masa e ir variando las propiedades físicas de los elementos. Esto último permite desacoplar las capas del sistema e influye en el comportamiento acústico. Es importante también tener en cuenta para la composición, que ninguna de las capas tenga espacios de aire amplios que puedan actuar como cajas de resonancia para el sonido que se traspase.

2.3.2. Diseño contra fuego

Al igual que para el diseño acústico, para diseñar elementos expuestos al fuego existen sólidas herramientas teóricas. En particular para la construcción en madera, el tema del fuego ha sido muy estudiado y presenta avances importantes normativos y de cálculo a nivel mundial. En Chile se está desarrollando una norma de cálculo para estructuras de madera expuestas al fuego, basada en las normas australianas, europeas, canadienses y estadounidenses, que ya permiten validar soluciones solo a través del cálculo.

Una parte de este proyecto de norma consiste en la aprobación del método por adición de componentes, o método CAM por sus iniciales en inglés, el cual funciona por la adición del tiempo de resistencia al fuego de cada componente del elemento. Para tener un acercamiento analítico al valor esperado de la resistencia al fuego de un sistema de entrepiso este es el método que podría llegar a utilizarse. El problema con dicho método, es que según el anteproyecto de norma chileno, solo está validado para elementos verticales y para resistencias de hasta F-60.

Según la memoria de Diego Ortiz para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile, del año 2018, donde se analizan los resultados de ensayos chilenos y métodos existentes en normas internacionales, estas son adaptables a las características de estructuras nacionales [15]. Sin embargo, señala también que para lograrlo, es necesario calibrar el método a los materiales fabricados y normar las características de los productos disponibles en Chile, pues las características de los tableros de yeso-cartón por ejemplo, varían incluso entre aquellos que son producidos en distintas épocas por un mismo fabricante.

Así, la mejor forma de anticipar la resistencia al fuego que pueda tener un sistema, es comparándola con aquellas disponibles en el listado de soluciones acreditadas del MINVU, donde existen entresijos de madera con resistencias de hasta F-60.

Sin embargo, como ya se mencionó, la validación oficial de la solución propuesta debe ser a través de ensayos y cualquier cálculo teórico o análisis comparativo previo, solo sirve para tener un valor de referencia antes de pasar a la etapa de ensayos.

2.3.3. Diseño estructural

Finalmente, la parte más conocida y con el respaldo analítico más sólido del análisis que se deberá hacer sobre el elemento a proponer, es el diseño estructural. Como ya se ha mencionado, existen varias restricciones al diseño de los elementos, comenzando por la resistencia estructural del mismo. Sin embargo, rara vez es esta la restricción que controla el diseño, pues lo normal es que sean las restricciones de serviciabilidad (deformación máxima y vibraciones) las que impongan las condiciones para el diseño.

La deformación máxima se presenta como una restricción que está en función de la distancia entre apoyos del elemento (luz). A su vez, la expresión que determina la deformación de un elemento está en función de la luz al cubo, por lo que la luz entre apoyos resulta una variable muy importante a determinar. Como ya se ha mencionado, esto se hará observando los requerimientos del mercado inmobiliario. Por otra parte, las vibraciones, que dependen de la frecuencia natural del elemento, son controladas tanto por la luz como por la masa del mismo. Así, estas variables son tomadas en cuenta a través de las fórmulas y métodos de cálculo de las ya mencionadas normas de cálculo estructural.

Capítulo 3

Restricciones y Supuestos Para el Diseño

3.1. Restricciones de dimensiones en el mercado inmobiliario chileno

Para poder llevar a cabo este trabajo de título, cuyo objetivo es diseñar un sistema que se pueda utilizar en edificios habitacionales en Chile, es esencial que dicho sistema cumpla con las expectativas de los arquitectos que diseñan los departamentos. Es por eso que se deben verificar las condiciones de serviciabilidad y de resistencia que sean necesarias para un sistema de entrepiso como el deseado, específicamente bajo las condiciones arquitectónicas que impone el mercado inmobiliario chileno.

Para ello entonces, como para cualquier elemento resistente horizontal, las principales variables estructurales a tener en cuenta son la carga que debe resistir el elemento y las distancias entre los apoyos del mismo. En este sentido, según análisis previos, se ha encontrado que la principal variable que controla el diseño de los elementos de entrepiso en su relación con la arquitectura de los departamentos, es la distancia entre apoyos que se considere para el elemento. Esto porque la variable de la carga se obtiene directamente de la normativa y no varía entre los distintos departamentos habitacionales.

3.1.1. Análisis de planos publicados por inmobiliarias

Para comenzar, se ha recurrido a información disponible abiertamente en internet, buscando planos de departamentos en las páginas web de distintas inmobiliarias. En ese proceso, se ha optado por analizar solo aquellas inmobiliarias que tienen las plantas de departamentos con las dimensiones de todas las habitaciones y espacios habitables especificadas. Esto para poder hacer un análisis previo a las entrevistas con arquitectos de las mismas inmobiliarias.

Así, las plantas utilizadas para llevar a cabo el análisis fueron de departamentos de las inmobiliarias Absalon (11), Almagro (17), Arauco (7), Echeverría Izquierdo (11) y Socovesa (12), llegando a un total de 58 plantas de departamentos revisadas. En la sección de anexos

se presenta la tabla B.1 con el detalle del análisis, donde se identifica claramente cada departamento y sus dimensiones, mientras que a continuación, en la tabla 3.1 se muestra un resumen de los datos recogidos.

Tabla 3.1: Luces máximas por cubrir en departamentos analizados

Rango [m]	Nº de departamentos	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
0,0 - 3,0	9	16 %	16 %
3,0 - 3,25	4	7 %	22 %
3,25 - 3,5	3	5 %	22 %
3,5 - 3,75	15	26 %	53 %
3,75 - 4,0	6	10 %	64 %
4,0 - 4,5	5	9 %	72 %
> 4,5	16	28 %	100 %

3.1.2. Información recopilada de entrevistas

La segunda parte del análisis de las condiciones inmobiliarias consiste en entrevistas con arquitectos del área inmobiliaria. Para ello, se llevaron a cabo entrevistas con arquitectos que trabajan en proyectos de las inmobiliarias Almagro (José Miguel Gayo), Arauco (José di Girolamo) y Echeverría Izquierdo (Leopoldo Morales), además de una entrevista con el arquitecto Cristián Izquierdo, socio de Izquierdo Lehmann arquitectos, con experiencia en el área inmobiliaria y en el diseño de casas de madera.

Además de pedirle las impresiones generales acerca de este sistema y la factibilidad de ser utilizado en proyectos inmobiliarios a los arquitectos, los temas tratados en cada reunión fueron en primer lugar, comprobar las luces estimadas para el diseño a partir de los planos inmobiliarios disponibles en internet. Luego, En caso de que sea necesario, ver la posibilidad de agregar vigas que acorten las luces de los espacios habitables y aclarar tanto la profundidad como la ubicación que podrían tener de esas eventuales vigas. Finalmente, consultar por las consideraciones que se deberían tener acerca del espesor del sistema y cuánta importancia darle a ello.

En primer lugar, al ser consultados por los espacios habitables que determinarían las luces, la respuesta fue que siempre iba a depender del segmento al que esté dirigido el departamento, pues en general, los departamentos más caros no solo tiene dimensiones totales mayores, sino que todos los espacio son más grandes. Sin embargo, si se considera un tipo de vivienda que no apunta a los segmentos más altos, en todas las entrevistas se dijo que una dimensión máxima de 4 metros es suficiente para los recintos habitables. El problema de eso, mencionaron los arquitectos di Girolamo y Morales, es que muchas veces, aunque el diseño siempre comienza a partir de las zonas habitables, este termina siendo modificado para adaptarse a los muros que llegan hasta las fundaciones y que pasan por los estacionamientos. Si ese es el caso, se necesitarían espacios libres de 2,5 por 5 metros, por lo que tener muros cada 4 metros, podría no ser algo conveniente pensando en el aprovechamiento del espacio.

Luego, al comentar la posibilidad de incluir vigas en los puntos donde sea necesario acortar

las luces, todos los arquitectos entrevistados se mostraron abiertos a ello, entendiéndolo como un elemento estructural que, a su juicio, no molesta desde el punto de vista de la arquitectura. Además, por lo que se observó en las plantas analizadas, el 67 % de los casos que superan una luz de 4 metros de la tabla 3.1, se da en los pasillos, lo que hace más fácil todavía incluir vigas. Como consideración, lo único que mencionaron los cuatro arquitectos, fueron las restricciones normativas en términos de la altura mínima de zonas habitables. Solo el arquitecto Leopoldo Morales comentó que en algunos casos, los arquitectos pueden no querer incluir vigas, pero aclaró que eso no es algo generalizado, que esa no era su postura y que para él, incluso puede llegar a ser atractivo visualmente.

De acuerdo a eso entonces, se volvieron a revisar las plantas de los departamentos analizados en un principio y se incluyeron las posibles vigas en los puntos conversados con los arquitectos. Así, las luces consideradas en la tabla 3.1 disminuyen y resulta lo que se muestra en la tabla 3.2 a continuación:

Tabla 3.2: Luces por cubrir en departamentos analizados con vigas propuestas

Rango [m]	Nº de departamentos	Porcentaje	Porcentaje acumulado
0,0 - 3,0	17	29 %	29 %
3,0 - 3,25	6	10 %	40 %
3,25 - 3,5	6	10 %	50 %
3,5 - 3,75	18	31 %	81 %
3,75 - 4,0	4	7 %	88 %
4,0 - 4,5	1	2 %	90 %
>4,5	6	10 %	100 %

Finalmente, ante la consulta sobre la importancia que pueda tener el espesor del entrepiso, los arquitectos entrevistados respondieron que para el tipo de edificio que se está considerando (de 4 a 6 pisos) el espesor del entrepiso no debería ser un problema importante. Comentaron que el espesor del entrepiso o de las losas, puede llegar a tener importancia en edificios de mayor altura, donde una de las restricciones del diseño sea precisamente la altura del edificio. En esos casos, el espesor de un entrepiso o una losa puede llegar a marcar la diferencia entre hacer o no un piso más, teniendo consecuencias muy importantes sobre el proyecto. Lo que sí se repitió en las entrevistas, es que habría que tener precaución con cómo repercute el espesor del entrepiso sobre los peldaños de las escaleras, que habría que considerar tal vez un poco más de espacio para las escaleras, pero que en todo caso es un tema que no debería causar mucho problema y no es de la incumbencia del diseño del sistema de entrepiso.

Yendo ya más hacia los comentarios aportados por cada uno de los entrevistados, el arquitecto Cristián Izquierdo, menciona que desde su experiencia, algo absolutamente necesario para que el sistema a diseñar sea utilizable en el mercado inmobiliario, es el tema de las deformaciones de la madera. Por la costumbre tan arraigada en Chile de que los edificios sean de hormigón (y algunos más pequeños de albañilería), los habitantes de los edificios chilenos están muy acostumbrados a la rigidez de los sistemas y a las características inherentes de estos materiales más pesados. Es por eso que para que un proyecto de edificio en Chile sea viable, se debe asegurar que la estructura no tenga grandes deformaciones, que tenga un comportamiento lo más rígido posible y que tenga un muy buen desempeño acústico. Esto es especialmente importante al comienzo de la construcción en madera, pues existen muchas

desconfianzas que van más allá de lo técnico y que si no se consideran, pueden hacer de un sistema igualmente inviable.

Este último comentario es tomado en cuenta a través de la inclusión de la norma europea para la verificación de vibraciones, además de apuntar a niveles de deformación más exigentes que lo que dice la norma chilena. Se espera que con eso, los movimientos del sistema de entepiso queden fuera de los rangos que causan molestias a los habitantes.

Algo similar menciona el arquitecto Leopoldo Morales, asegurando que cualquier sistema siempre le debe dar confianza al cliente, más allá de lo puramente normativo y técnico. Además comenta que desde su punto de vista, para que una inmobiliaria adopte un sistema nuevo como solución, debe considerar y efectivamente darle solución a todos los temas con los que se relacione. En esa línea, tanto Cristián Izquierdo, como Leopoldo Morales, recalcan que es necesario considerar el tema de las instalaciones en un eventual diseño, pues si se presenta un sistema con el tema de las instalaciones “por resolver”, es muy complicado que algún arquitecto lo quiera adoptar.

3.1.3. Caso de viviendas sociales

Otro punto importante que se puede abarcar es el ámbito de las viviendas sociales. Se analiza para ello el “Cuadro normativo y tabla de espacios y usos mínimos para el mobiliario”, documento del Ministerio de Vivienda y Urbanismo que regula las dimensiones mínimas que deben tener las viviendas sociales [11]. La idea de éste análisis es asegurarse de que el sistema a diseñar sea utilizable también en proyectos de edificios de madera para vivienda social.

Del documento recién señalado se observa que de todos los recintos habitables, la luz crítica que se podría considerar es de 3 metros, correspondiente a los dormitorios. Luego, eso permite asegurar que un diseño como el que se está considerando en este proyecto, sería utilizable en edificios de vivienda social. El único caso que restaría por resolver, dependiendo ya de cada diseño en particular, sería el de los posibles pasillos, que se pueden resolver mediante vigas cortas en las entradas y/o salidas de los pasillos, de manera similar a los departamentos analizados en las inmobiliarias.

3.1.4. Conclusiones acerca de las dimensiones

A partir de toda la información obtenida, entre análisis de plantas disponibles en internet, documentos normativos y entrevistas con arquitectos, se alcanza uno de los objetivos del proyecto. Se presenta como un supuesto importante para el diseño, que el cálculo deberá considerar luces de 4 metros como máximo, pues como se observa en la tabla 3.2, un 88 % de las plantas analizadas tienen luces menores 4 metros. Considerando además que el análisis incluye departamentos dirigidos a distintos estratos (departamentos desde 30 hasta 150 m^2 en diversas comunas), una luz de 4 metros cumple con las expectativas del proyecto de ser utilizado en una gran variedad de edificios habitacionales.

Para cumplir con ello, se deben considerar como puntos de apoyo la mayoría de los elementos verticales separadores de habitaciones, que normalmente son solo tabiquería. Así, a diferencia de la construcción tradicional, se deberán considerar los muros de “tabiquería”, como muros que están tomando una carga vertical.

Los porcentajes mencionados para concluir que las luces a considerar sean de 4 metros, consideran la inclusión de vigas para acortar las luces en los casos en que el diseño de arquitectura original tenga espacios de más de 4 metros. En este sentido, lo que ha arrojado el estudio es que esto ocurre normalmente en pasillos (67 % de los casos analizados), por lo que la propuesta de solución es incluir vigas en las entradas y/o salidas de pasillos a recintos habitables, para generar el menor impacto posible sobre la arquitectura de los departamentos.

Además, para solucionar la problemática de que los estacionamientos necesitan dimensiones de 2,5 por 5 metros, se propone que en los casos en los que se requiera tener estacionamientos en el primer piso, se utilice una solución distinta a la presentada en este proyecto, como por ejemplo, un primer piso de hormigón armado o simplemente con vigas laminadas, de mayores dimensiones. Se propone esta misma solución en caso de que el primer piso requiera de áreas comerciales u otras condiciones distintas, con luces que sobrepasen los 4 metros.

3.2. Construcción industrializada

Como ya se ha mencionado, este trabajo de título considera un diseño industrializado. Para ello, hay que asegurarse de que sea posible materializar el sistema respetando ciertos principios determinados principalmente a partir de la experiencia que se ha recabado en la planta de la empresa E2E y con los profesionales que han estado en terreno, en el montaje de las estructuras. De esta manera se pretende conocer cuáles son sus mayores consideraciones para trabajar con estos elementos en obras construidas en Chile y así considerarlas en el diseño.

Los principales temas que han sido observados como importantes para la construcción industrializada son, por una parte, la rapidez y la simplicidad en el armado del elemento y por otro lado, la facilidad de manipulación y transporte de los módulos. Además, se pretende tomar en consideración la disminución al mínimo de los desechos generados en la fabricación de los módulos.

Para tomar en cuenta que la fabricación sea rápida, se debe disminuir lo que más se pueda la cantidad de elementos y detalles a incluir en la fabricación. Además, se debe considerar la interacción entre los materiales que se vayan a utilizar, además de cómo se trabaja cada material con los distintos tipos de herramientas.

La manipulación y transporte se pueden abordar desde el peso y las dimensiones del elemento. Así, es conveniente tener módulos que puedan ser manipulados y transportados por distintos tipos de maquinaria. Por ejemplo, en general las grúas horquillas pueden cargar desde 1500 *kg* hasta varias toneladas dependiendo de su capacidad, por lo que módulos de un

peso menor 1500 *kg*, podrían ser transportados en cualquier tipo de fábrica u obra con grúa. Por otro lado, hay que considerar las restricciones que impone el transporte de los elementos desde el lugar de fabricación al de montaje. Normalmente los camiones que transportan dichos elementos son de 2,5 metros de ancho por 12 metros de largo, pudiendo aumentar con permisos especiales, por lo que el diseño se adecúa a dichas medidas.

Se debe considerar también hacer el elemento lo más estable posible en todo momento, para que la manipulación dentro del proceso de producción no genere deformaciones indeseadas y produzca problemas de calidad, por ejemplo, no es conveniente tener vigas muy largas que no estén arriostradas de alguna manera entre ellas desde el comienzo del proceso. Por último, los estados de carga que se dan en la manipulación del elemento y en el almacenamiento deben estar de igual forma calculados y se debe asegurar que no se compromete la calidad del producto en ninguna de esas dos etapas.

Por último, para considerar la disminución de los desechos del proceso, el diseño contempla la adecuación de sus medidas a las medidas de los materiales disponibles.

3.3. Materiales disponibles para entrepisos de madera en Chile

La siguiente etapa de identificación de restricciones, consiste en determinar las características y dimensiones de los materiales a utilizar en el sistema de entrepiso. La idea de esto es dejar claramente estipulado cuáles son las posibilidades de construcción en madera en Chile, en cuanto a dimensiones y calidades de madera. Esto se toma en cuenta en la etapa de diseño, evitando que se vayan a considerar elementos no disponibles en el mercado chileno, lo que haría imposible la materialización del diseño. Los factores que se toman en cuenta entonces para el análisis son las dimensiones comerciales de los elementos y la calidad de la madera disponible según la NCh1198.

3.3.1. Madera aserrada

La madera aserrada disponible para un diseño como este debe tener a lo menos 4 metros de largo, pues como ya se explicó en la sección 3.1, las luces que deben cubrir los entrepisos diseñados son de 4 metros. Para ello, se consideran vigas de madera aserrada estructural (MAE) cuyos principales productores en Chile son Arauco y CMPC, por lo que el análisis se basa en sus productos, que son fácilmente adquiridos en cualquier parte del país.

Así, los catálogos de Arauco, muestran que producen vigas de 2x6" (41x138 *mm*) y de 2x8" (41x185 *mm*), ambas en largos de 4 y 4,88 metros, con clasificación visual para uso estructural de grado G2.

A su vez, CMPC tiene vigas de MAE de las mismas escuadrías y dimensiones que Arauco, pero en este caso, con una clasificación mecánica para uso estructural de grados C16 y C24.

3.3.2. Tableros OSB

Los tableros de OSB que se van a considerar para este análisis son los producidos por LP, pues de manera similar a lo que ocurre con Arauco y CMPC con la MAE, los tableros de LP pueden obtenerse a lo largo de todo el país. El productor LP tiene variaciones de tableros dependiendo de las condiciones a las que están expuestos los mismos. En el caso de este proyecto se considera que los tableros no están expuestos a humedad ni a amenazas biológicas como termitas, por lo que se toman en cuenta los tableros estructurales “OSB APA”, sin aditivos adicionales.

Dichos tableros tienen espesores de 9,5 *mm*, 11,1 *mm*, 15,1 *mm* y 18,3 *mm*, todos con dimensiones definidas de 1,22x2,44 metros y se pueden encontrar fácilmente en las principales ferreterías. Además de estos productos, LP puede producir en grandes pedidos tableros de OSB de 4,88 metros de largo (también 1,22 metros de ancho) en todos los espesores mencionados.

Las calidades estructurales de los tableros están definidas en los catálogos de LP y son presentadas más adelante en este informe.

3.4. Análisis normativo

Para poder llevar a cabo el diseño estructural de un elemento que se pueda utilizar en el mercado chileno, es necesario considerar las normas que rigen la construcción en Chile. Además, como punto de partida para el diseño, se ha considerado un envigado de madera aserrada, con tableros estructurales, tanto por arriba como por abajo de las vigas; por sobre el tablero estructural superior, una membrana que contribuya al aislamiento acústico y otro tablero que esté dispuesto para recibir el tipo de pavimento que se quiera colocar; por debajo del tablero estructural inferior, distanciadores que faciliten la manipulación, permitan la colocación de instalaciones y sean los elementos a los que se fijan tableros de yeso-cartón que compondrán el cielo del sistema. Es por eso que se analizan los documentos atinentes a este proyecto (considerando la idea previa de diseño mencionada) que se resumen a continuación.

3.4.1. Ordenanza general de urbanismo y construcciones (O.G.U.C.)

Se comienza por analizar la O.G.U.C. [12], que tal como lo señala en su primer artículo, es un documento que regula el proceso de construcción y los estándares técnicos de diseño.

Recordando que este proyecto tiene como objetivo diseñar un elemento de entrepiso para edificios habitacionales, utilizable en Chile, se estudia el documento, resaltando y mencionando únicamente aquellos títulos, capítulos y artículos que influyan en el diseño del sistema. Para ello se presentan los títulos de la O.G.U.C. seguidos de un resumen de cada una de las partes que tiene injerencia sobre el diseño del elemento.

TITULO 4: DE LA ARQUITECTURA

El título 4 trata acerca de las consideraciones arquitectónicas, de habitabilidad y seguridad. Estas son incumbentes para este proyecto pues representan las restricciones no estructurales que van a regir el diseño del elemento.

Capítulo 1: Condiciones de habitabilidad

El primer artículo que se menciona, muestra las restricciones de altura habitable a considerar. Si bien esto no afecta al diseño del propio elemento (pues los entresijos van apoyados directamente sobre los muros), para tener diseños de edificios completos con luces de máximo 4 metros, se presentan como necesarias las vigas en zonas de pasillos. Por lo que esas vigas deben tener una profundidad tal que permitan la altura habitable reglamentada.

Así, el artículo 4.1.1 establece que en las edificaciones destinadas a vivienda se consideren como locales habitables aquellos destinados a la permanencia de personas (dormitorios, habitaciones, comedores) y no habitables aquellos que son destinados al tránsito o estadía esporádica (baños, cocinas, pasillos).

Bajo estas definiciones, las vigas propuestas en zonas de pasillos, quedarían en locales no habitables, por lo que según la misma O.G.U.C. deben tener una altura libre de 2 metros. En caso de que alguna viga quede en locales habitables, esta debe tener una profundidad tal que permita una altura libre de por lo menos 2,30 metros. Considerando muros de 2,40 metros de altura, sobre los cuales van apoyados los entresijos, las vigas no pueden tener una profundidad mayor a 40 centímetros en locales no habitables y 10 centímetros en caso de estar en locales habitables.

Más adelante en el mismo capítulo, el artículo 4.1.6 presenta las exigencias acústicas de los elementos divisorios entre unidades de viviendas, categorización que abarca a los entresijos. Se explican tanto los requerimientos, como las opciones para acreditar su cumplimiento. De aquí se desprende que la acreditación del diseño de este proyecto va a ser a través de un informe de ensayo siguiendo las normas especificadas en el artículo.

Así entonces, el punto 1 del artículo explica que los elementos constructivos horizontales o inclinados, entre los que se encuentran los entresijos, deberán tener un índice de reducción acústica mínima de 45 dB y presentar un nivel de presión acústica de impacto normalizado máximo de 75 dB, verificados según las condiciones del número 4 del mismo artículo, que menciona las siguientes alternativas:

- A La solución constructiva especificada para los elementos horizontales, verticales o inclinados deberá corresponder a alguna de las soluciones inscritas en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Aislamiento Acústico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- B Demostrar el cumplimiento de las exigencias señaladas anteriormente en el mismo artículo para la solución especificada, mediante una de las siguientes alternativas:
 - 1 Informe de ensayo: El índice de reducción acústica se verifica de acuerdo al método de ensayo especificado en NCh 2786, ponderado según ISO 717-1. El nivel de presión acústica de impacto normalizado se comprueba de acuerdo al método de

ensayo especificado en ISO 140-6, ponderado según ISO 717-2.

- 2 Informe de inspección: El índice de reducción acústica se verifica de acuerdo al método de ensayo especificado en NCh 2785, ponderado según ISO 717-1. El nivel de presión acústica de impacto normalizado se comprueba de acuerdo al método de ensayo especificado en ISO 140-7, ponderado según ISO 717-2.

En ambos casos, se deberá especificar en detalle los materiales y la solución constructiva a través de un informe.

En el caso del ensayo, el informe deberá ser emitido por un laboratorio con inscripción vigente en el Registro Oficial de Laboratorios de Control Técnico de Calidad de la Construcción del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, reglamentado por el D.S. N° 10 (V. y U.), de 2002.

De igual manera, en el caso de la inspección, el informe deberá ser emitido por una entidad con inscripción vigente en el Registro Nacional de Consultores del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, reglamentado por D.S. N° 135 (V. y U.), de 1978, en el Rubro Estudios de Proyectos, Especialidad Otros Estudios, Subespecialidad Acústica o por un laboratorio con las mismas credenciales necesarias para el informe del ensayo.

Capítulo 3: Condiciones de seguridad contra incendio

De manera similar a las restricciones acústicas, se presentan las restricciones ligadas a la respuesta frente al fuego del elemento. Se explica en los siguientes párrafos, cómo los artículos presentados en el capítulo 3, influyen en las consideraciones que se deben tomar para este proyecto. Se muestran en primer lugar algunas generalidades y luego dos tablas que permiten determinar claramente cuál es el nivel de resistencia al fuego que debe tener un sistema de entresuelo como el que se presenta en este proyecto, algo que ya fue resumido en la tabla 2.1.

El artículo 4.3.2 establece las normas con las cuales se determinará el comportamiento al fuego de los materiales, elementos y componentes. Allí se señala que la resistencia al fuego de elementos de construcción en general se determinará según la norma NCh 935/1 Ensaye de resistencia al fuego - Parte 1: Elementos de construcción general.

Sin embargo, también hay un “Listado Oficial de Comportamiento al Fuego”, confeccionado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo o por la entidad que éste determine, en el cual se registrarán, mediante valores representativos, las cualidades frente a la acción del fuego de los materiales, elementos y componentes utilizados en la actividad de la construcción. Luego, las características de comportamiento al fuego de los materiales, elementos y componentes utilizados en la construcción, exigidas expresamente en el capítulo 3 de la O.G.U.C., que no se encuentren incluidas en el Listado Oficial de Comportamiento al Fuego, deberán acreditarse mediante el certificado de ensayo correspondiente emitido por alguna Institución Oficial de Control Técnico de Calidad de los Materiales y Elementos Industriales para la Construcción.

El artículo 4.3.3 establece que los edificios que requieran protegerse contra el fuego (explicitados en el artículo 4.3.4) deberán proyectarse y construirse según alguno de los cuatro tipos que se señalan en la tabla 3.3 y los elementos que se utilicen en su construcción deberán cumplir con la resistencia al fuego que en dicha tabla se indica, según los métodos del artículo 4.3.2 (ensayo o listado de soluciones).

Tabla 3.3: Resistencia al fuego requerida para los elementos de construcción de edificios

ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN									
Tipo	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
a	F-180	F-120	F-120	F-120	F-120	F-30	F-60	F-120	F-60
b	F-150	F-120	F-90	F-90	F-90	F-15	F-30	F-90	F-60
c	F-120	F-90	F-60	F-60	F-60	-	F-15	F-60	F-30
d	F-120	F-60	F-60	F-60	F-30	-	-	F-30	F15

Simbología incumbente:

Elementos horizontales:

(8) Elementos soportantes horizontales

(9) Techumbre incluido cielo falso

Como se mencionó, el artículo 4.3.4. explica el tipo de edificio que se deberá considerar en la tabla 3.3. Así, para aplicar lo dispuesto en el artículo anterior deberá considerarse, además del destino y del número de pisos del edificio, su superficie edificada, o la carga de ocupación, o la densidad de carga combustible, según corresponda, como se señala en las tres tablas que se contienen en el artículo. Sin embargo, se presenta solo una parte de una de las tablas, que es la que contiene la información de los tipos de edificios habitacionales.

Tabla 3.4: Categorización de edificios habitacionales

Destino del edificio	Superficie utilizada [m^2]	Número de pisos						
		1	2	3	4	5	6	7 o más
Habitacional	Cualquiera	d	d	c	c	b	a	a

TITULO 5: DE LA CONSTRUCCIÓN

El título 5 es más centrado en la construcción de la estructura y en cuanto a lo que a este proyecto le concierne, en este título se ven los materiales y cargas de las estructuras. Se muestra así un resumen de los capítulos y artículos que contienen información a considerar para el diseño del elemento de entrepiso, tomando en cuenta que siempre deberá haber un proyecto de estructura a desarrollar por un calculista que avale las materialidades y considere las particularidades del mismo proyecto.

Capítulo 3: Clasificación de las construcciones

El artículo 5.3.1 clasifica los edificios en clases de construcción según los materiales predominantes a emplear y al tipo de estructura. Se mencionan las clasificaciones relacionadas con este proyecto.

Clase C: Construcciones con muros soportantes de albañilería de ladrillo confinado entre pilares y cadenas de hormigón armado. Entrepisos de losas de hormigón armado o entramados de madera.

Clase D: Construcciones con muros soportantes de albañilería de bloques o de piedra, confinados entre pilares y cadenas de hormigón armado. Entrepisos de losas de hormigón

armado o entramados de madera.

Clase E: Construcciones con estructura soportante de madera. Paneles de madera, de fibrocemento, de yesocartón o similares, incluidas las tabiquerías de adobe. Entrepisos de madera.

Clase F: Construcciones de adobe, tierra cemento u otros materiales livianos aglomerados con cemento. Entrepisos de madera.

Clase H: Construcciones prefabricadas de madera. Paneles de madera, yesocartón, fibrocemento o similares.

A continuación, el artículo 5.3.2, impone ciertas condiciones que limitarían mucho a los edificios de madera o con entrepisos de madera, como por ejemplo que construcciones clase C no pueden tener más de cuatro pisos, o que las construcciones clase D y H no pueden tener más de dos pisos. Sin embargo, deja claro que, si hay un proyecto de estructuras que lo respalde, el proyecto no deberá considerar esas restricciones. Esto último es de suma importancia de mencionar, pues sin la condición de que el proyecto de estructura permita obviar estas restricciones, el presente trabajo de título carecería de sentido.

De igual manera, en el mismo artículo se explica que las construcciones con estructura soportante de madera y las prefabricadas de madera a que se refieren las clases E y H, deberán cumplir con las disposiciones del artículo 5.6.8. Igualmente las piezas o elementos de madera, ya sea estructural o de terminación, sometidos o no a cálculo estructural que contengan las demás clases de construcción, deberán cumplir con las disposiciones de los artículos 5.6.6. y 5.6.8.

Capítulo 4: Solicitaciones de las construcciones

El capítulo 4 del título 5, se presentan algunas sobrecargas y pesos propios a considerar para el cálculo. Se muestran aquí los valores que son de utilidad para el diseño del elemento.

Los artículos 5.4.1 y 5.4.2 ponen a disposición los siguientes valores para el avalúo del peso propio y para las sobrecargas respectivamente:

- Laurel, Pino Insigne y Pino Oregón: 750 kg/m^3
- Pisos de departamentos y dormitorios de hoteles: 200 kg/m^2

Capítulo 6: Condiciones mínimas de elementos de construcción no sometidos a cálculos de estabilidad

A pesar del nombre que lleva el capítulo 6, de los artículos allí contenidos, se presentan a continuación solo aquellos que el artículo 5.3.2 establece como obligatorios, independientemente de que tengan o no proyecto de cálculo estructural.

Así, según el artículo 5.6.6, los entramados de madera deberán ejecutarse con piezas aceptadas según agrupamiento y clasificación que estén contempladas en las normas NCh 1989, NCh 1970/1, NCh 1970/2 y NCh 1207.

A su vez, según el artículo 5.6.8, Los elementos estructurales de madera deberán cumplir con los siguientes requisitos:

- Ser aceptada por la NCh 1989 Maderas - Agrupamiento de especies madereras según su resistencia - procedimiento.
- Su humedad deberá quedar comprendida dentro de los límites establecidos en la tabla que presenta el mismo punto de la O.G.U.C.
- Su durabilidad, de acuerdo a la norma NCh 789/1 Maderas - Parte 1: Clasificación de maderas comerciales por su durabilidad natural, deberá corresponder a las cuatro primeras categorías de la tabla de durabilidad que se presenta en el mismo punto, o bien, a la quinta categoría, pero en este último caso deberá haber sido preservada conforme a la norma NCh 819.

No se presentan las tablas a las que se hace referencia en los puntos precedentes, pues se estima que no son de incumbencia para el diseño de este proyecto, sino que lo son para un eventual proyecto. Sin embargo, se hace la acotación de que en la tabla referente a durabilidad de la madera según especie, solo interesa el pino insigne, que es la madera a la que se tiene acceso en el mercado nacional y con la cual se ha diseñado el presente proyecto. Dicha especie está en la quinta categoría, por lo que la madera a utilizar en una eventual materialización de la solución, debe ser tratada según la norma especificada.

3.4.2. Normativa estructural chilena

NCh 1198: Madera - Construcciones en Madera - Cálculo

La norma NCh 1198 establece métodos y procedimientos de diseño estructural que son las condiciones mínimas a cumplir por elementos y uniones en construcciones de madera. Así entonces se van mencionando los títulos de las secciones y resumiendo los contenidos de la norma que tienen que ser considerados en el diseño del elemento de entrespaño.

4 Consideraciones de diseño

4.3 Cargas y combinaciones de ellas

Se especifica que para determinar solicitaciones de pesos propios y sobrecargas se debe acudir a la NCh 1537. Como ese es el único tipo de carga que se considera para el diseño del elemento en servicio, no se incluyen las demás cargas y normas mencionadas en esta sección de la NCh 1198.

Se menciona también que los valores de tensiones y capacidades de carga admisibles están considerados para solicitaciones con duraciones efectivas, continuas o acumuladas de 10 años. Es por eso que se deben corregir los valores dados, usando los factores de modificación determinados por la misma norma, de acuerdo al tiempo y otras condiciones a las que se va a exponer el sistema.

5 Tensiones y módulos elásticos para la madera aserrada

5.2 Tensiones admisibles y módulos elásticos para madera aserrada

A pesar de que en la norma se menciona en varias oportunidades, el factor de la humedad en las tensiones admisibles no se considera para el diseño, pues se asume que la madera con la que se construirán los sistemas de entrepiso, será madera seca. Además, los elementos de entrepiso no están expuestos al exterior, por lo que se asume que no van a sufrir los efectos de la humedad.

Para el cálculo estructural, se considera que las piezas de madera aserrada son de pino radiata. Además, como se explica más adelante, se considera también que las vigas trabajan como sistema compuesto, por lo que se toman en cuenta las tensiones admisibles de flexión, compresión paralela, tracción paralela y cizalle, más los módulos de elasticidad correspondientes a sus grados estructurales.

Es por las razones recién expuestas que todas las tensiones admisibles de madera aserrada que deben ser consideradas en este estudio, se resumen en la tabla 3.5, elaborada a partir de la tabla de tensiones admisibles para Pino Radiata de la NCh1198.

Tabla 3.5: Tensiones admisibles de Pino Radiata, (MPa)

Grado Estructural	Flexión ⁽¹⁾ F_f	Compresión paralela F_{cp}	Tracción paralela ⁽¹⁾ F_{tp}	Cizalle F_{cz}	Módulo de elasticidad en flexión ⁽²⁾ E_f
a) Visuales					
GS	11	8,5	6	1,1	10.500
G1	7,5	7,5	5	1,1	10.000
G1 y mejor	9,5	7,8	5,5	1,1	10.100
G2	5,4	6,5	4	1,1	8.900
b) Mecánicos					
C24	9,3	8	4,7	1,1	10.200
C16	5,2	7,5	3,5	1,1	7.900
MGP10	8,4	10	4	1,3	10.000
MGP12	13,5	15,5	6	1,3	12.700
(1) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal 90 mm.					
(2) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal ≥ 180 mm. El módulo de elasticidad característico inherente al percentil del 5%, E_{fk} , se puede estimar como 0,6 E_f .					

6 Factores de modificación

6.1 Factores de modificación de aplicación general

Se especifican los factores de modificación por humedad, por duración de la carga, por trabajo en conjunto en flexión, por temperatura y por tratamiento químico. Sin embargo, de estos, para el diseño del entrepiso solo se considera el factor de modificación por duración de la carga y por trabajo conjunto en flexión, que se muestran en las expresiones 3.1 y 3.2 a continuación.

$$K_D = \frac{1,747}{t^{0,464}} + 0,295 \quad (3.1)$$

En que

- t: duración de la carga, en (s).

Por otro lado, el factor de modificación por trabajo conjunto en flexión tiene un valor único de 1,15 y se aplica sobre la tensión admisible de aquellos elementos estructurales que, siendo a lo menos tres, se disponen de forma paralela, distanciados a no más de 610 mm de tal manera de que soporten la carga aplicada en conjunto.

$$\text{si } s \leq 610, \quad K_C = 1,15 \quad (3.2)$$

En que:

- s: espaciamiento entre vigas, en (mm).

Para determinar las tensiones de diseño y el módulo de elasticidad de diseño, se multiplican las tensiones admisibles y el módulo de elasticidad de flexión presentados en la tabla 3.5, por los factores de modificación generales y aquellos correspondientes a cada sollicitación.

7 Dimensionamiento de piezas estructurales de madera aserrada

El dimensionamiento de piezas debe asegurar condiciones de resistencia, es decir, que las tensiones de diseño sean superiores que las tensiones de trabajo calculadas. Además, en el caso de vigas sometidas a flexión, se debe asegurar también que estas tengan un nivel de deformación inferior a L/360 considerando solo la sobrecarga y de L/300 considerando tanto el peso propio como la sobrecarga.

Se menciona la esbeltez de volcamiento, que depende directamente de la longitud efectiva de volcamiento, que a su vez depende de la distancia entre apoyos laterales. Sin embargo, dado que el diseño considera la conexión por los cantos de las vigas a placas estructurales, no se toma en cuenta el análisis de volcamiento ni la inestabilidad lateral.

Para poder calcular las tensiones de diseño en flexión, solo falta considerar el factor de modificación por altura, que depende del grado estructural de la madera a utilizar. Así, para piezas clasificada visualmente, o mecánicamente en grados C16 o C24 y con una altura de sección transversal mayor que 90 mm, el factor de modificación por altura es:

$$K_{hf} = \frac{90^{1/5}}{h} \quad (3.3)$$

En que:

- h: altura de la sección transversal, en (mm).

Mientras que para piezas clasificadas mecánicamente en grados MGP10 ó MGP12, con una altura de sección transversal mayor que 160 mm, el factor de modificación por altura es:

$$K_{hf} = \frac{160^{1/3}}{h} \quad \text{para piezas grado MGP10} \quad (3.4)$$

$$K_{hf} = \frac{160^{1/2}}{h} \quad \text{para piezas grado MGP12} \quad (3.5)$$

En que

- h: altura de la sección transversal, en (mm).

Con los factores de modificación definidos, se calculan las tensiones de diseño con las expresiones 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9, definidas por la NCh 1198. Se muestran en las expresiones mencionadas todos los factores de modificación que especifica la norma, sin embargo, como ya se mencionó, en este estudio no se considera la modificación por humedad. Tampoco se considera el factor de modificación por rebaje en los apoyos, pues no aplica al sistema diseñado. Vale aclarar también que, así como existe la tensión de diseño en flexión en el borde traccionado, la NCh 1198 también indica la forma de calcular la tensión de diseño en el borde comprimido. Sin embargo, este último valor no se considera para el presente proyecto, pues se calcula a partir de la consideración de inestabilidad de los elementos flexionados, punto que en este proyecto se deja de lado por estar los elementos flexionados, completamente arriostrados.

$$F_{ft,dis} = F_f \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_C \cdot K_{hf} \quad (3.6)$$

En que:

- $F_{ft,dis}$ = Tensión de diseño en flexión en el borde traccionado, en (MPa);
- F_f = Tensión admisible en flexión, determinada según la tabla 3.5;
- K_H = Factor de modificación por contenido de humedad (no considerado en este estudio);
- K_D = Factor de modificación por duración de la carga, determinado según la fórmula 3.1;
- K_C = Factor de modificación por trabajo conjunto, determinado según 3.2;
- K_{hf} = Factor de modificación por altura, determinado según la fórmula 3.3, 3.4 o 3.5 dependiendo del grado estructural de la pieza.

$$F_{cp,dis} = F_{cp} \cdot K_H \cdot K_D \quad (3.7)$$

En que:

- $F_{cp,dis}$ = Tensión de diseño en compresión paralela, sin problemas de inestabilidad lateral, en (MPa);
- F_{cp} = Tensión admisible en compresión paralela, determinada según la tabla 3.5.

$$F_{tp,dis} = F_{tp} \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_{hf} \cdot K_{ct} \quad (3.8)$$

En que:

- $F_{tp,dis}$ = Tensión de diseño en tracción paralela, en (MPa);
- F_{tp} = Tensión admisible en tracción paralela, determinada según la tabla 3.5;
- K_{ct} = Factor de modificación por concentración de tensiones (0,8 para madera aserrada con perforaciones de clavos).

$$F_{cz,dis} = F_{cz} \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_f \quad (3.9)$$

En que:

- $F_{cz,dis}$ = Tensión de diseño en cizalle, en (MPa);
- F_{cz} = Tensión admisible en cizalle, determinada según la tabla 3.5;
- K_f = Factor de modificación por rebaje en los apoyos (no aplica a este diseño).

Dado que el diseño contempla un sistema de vigas que estará conectado mediante clavos a placas estructurales por ambos lados, la flexión no será tomada solo por las vigas de madera aserrada, sino que será distribuida entre la viga y las placas. Esto significa que se consideran vigas compuestas, tripartitas de simetría simple para el cálculo de la flexión como se muestra en la figura 3.1, cuya tensión de trabajo se calcula como se muestra en la expresión 3.10.

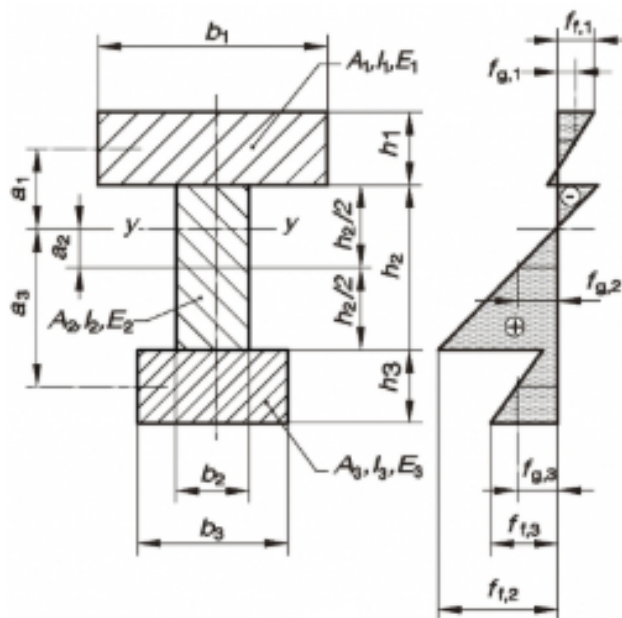


Figura 3.1: Esquema de viga compuesta, NCh 1198

$$F_{f,i} = \pm \frac{M}{I_{ef}} \cdot \left(\gamma_i \cdot a_i \cdot \frac{A_i}{A_{in}} + \frac{h_i}{2} \cdot \frac{I_i}{I_{in}} \right) \cdot n_i \cdot 10^6 \quad (3.10)$$

$$F_{g,i} = \pm \frac{M}{I_{ef}} \cdot \gamma_i \cdot a_i \cdot \frac{A_i}{A_{in}} \cdot n_i \cdot 10^6$$

En que:

- $F_{f,i}$ = Tensión de trabajo en flexión, en el borde de las piezas individuales (alas o alma), en (MPa) ;
- $F_{g,i}$ = Tensión de trabajo en el centroide de las piezas individuales (alas o alma), en (MPa) ;
- M = Momento flector, positivo cuando induce solicitaciones de compresión en las fibras del ala superior y tracción en el ala inferior, en $(kN \cdot m)$;
- a_i = Distancia entre los ejes de gravedad principales de las secciones transversales no debilitadas y el eje neutro de flexión condicionante del diseño Y-Y, en (mm) , siempre que: $0 \leq a_2 \leq 0,5 \cdot h_2$;
- h_i = Espesores o alturas de las secciones transversales individuales, en (mm) ;
- γ_i = Factores de reducción para el cálculo de I_{ef} , según la expresión 3.11;
- I_i, I_{in} = Momento de inercia de la sección transversal individual no debilitada y debilitada, respectivamente, en (mm^4) ;
- I_{ef} = Momento de inercia eficaz de la sección transversal no debilitada calculado según la fórmula 3.11, en (mm^4) ;
- A_i, A_{in} = Sección transversal no debilitada y debilitada de las piezas individuales, en (mm^2) ;
- b_i = Espesores de las secciones transversales individuales, en (mm) ;
- E_i = Módulo de elasticidad de las piezas individuales componentes de la sección transversal compuesta, en (MPa) ;
- E_r = Módulo de elasticidad referencial, elegido arbitrariamente, en (MPa) ;
- $n_i = \frac{E_i}{E_r}$

$$I_{ef} = \sum_{i=1}^3 (n_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot n_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (3.11)$$

Con:

- $\gamma_i = \frac{1}{1+k_i}$; $k_i = \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i'}{L^2 \cdot C_i}$; Para $i= 1$ y 3 ;
- $\gamma_2 = 1$
- $a_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_1 \cdot n_1 \cdot A_1 \cdot (h_1+h_2) - \gamma_3 \cdot n_3 \cdot A_3 \cdot (h_2+h_3)}{\sum_{i=1}^3 \gamma_i \cdot n_i \cdot A_i}$

En que:

- L = Distancia entre apoyos (luz que condiciona el diseño), en (mm) ;
- s'_1, s'_3 = Espaciamiento promedio de los elementos de unión que conectan las alas al alma, al suponerse dispuestos unilinealmente, en (mm) ;
- C_1, C_3 = Módulos de corrimiento de los elementos de unión utilizados para conectar las alas al alma determinado según la tabla 14 de la NCh 1198, en (N/mm) .

Dado que se consideran vigas compuestas, las distintas partes que componen la viga están expuestas a distintos esfuerzos. Es por eso que de las expresiones 3.10, la primera es para verificar que la tensión de trabajo en el borde, no sea mayor que la tensión de diseño en flexión calculada según la fórmula 3.6. A se vez, la segunda permite verificar que la tensión de trabajo en los centroides de cada pieza no sea mayor que la tensión de diseño en tracción

o compresión paralela de cada pieza (para los tableros, los valores de la tabla 4.4 presentada más adelante y para las vigas, lo calculado según las expresiones 3.7 y 3.8).

Además, para el caso que se analiza en este proyecto, el valor de diseño para el módulo de corrimiento entregado por la norma, para clavos en cizalle simple, es de 600.

Luego, se deben calcular también los elementos conectores entre las piezas que componen la viga. Para ello, primero se calcula el flujo de cizalle eficaz máximo, según la expresión 3.12, que luego es usado para calcular el espaciamiento promedio mínimo requerido para los medios de unión, como se muestra en la expresión 3.13.

$$t_{cz,ef,i} = \frac{Q_{max}}{I_{ef}} \cdot \gamma_i \cdot n_i \cdot S_i \cdot 10^3 \quad (3.12)$$

(con $i = 1$ y 3)

En que:

- $t_{cz,ef,i}$ = Cizalle máximo sobre los conectores, en (MPa) ;
- Q_{max} = Solicitación de corte máxima, en (kN) ;
- $S_i = A_i \cdot a_i$ = Momento estático de cada ala, referido al eje neutro de flexión condicionante del diseño Y-Y, en (mm^3) ;

$$s'_{req,i} = \frac{P_{el,dis,i}}{t_{cz,ef,i}} \quad (mm), \quad (\text{para } i = 1 \text{ y } 3) \quad (3.13)$$

En que:

- $P_{el,dis,i}$ = Capacidad de carga de diseño en extracción lateral en una superficie de diseño del elemento de unión utilizado, en (kN) .

Se calcula también la tensión de cizalle máxima, que se da en el plano de la fibra neutra del alma, a través de la expresión 3.14, que no puede ser mayor que la tensión de diseño en cizalle, dada por la expresión 3.9.

$$f_{cz,max} = \frac{Q_{max}}{b_2 \cdot I_{ef}} \cdot \sum_{i=1}^2 \gamma_i \cdot n_i \cdot S_i \cdot 10^3 \quad (MPa) \quad (3.14)$$

En que:

- $S_i = A_i \cdot a_i$ (para $i = 1$ y 3) = Momento estático de las alas referido al eje neutro condicionante del diseño Y-Y, en (mm^3) ;
- $S_2 = \frac{b_2}{2} \cdot \left(\frac{h}{2} - a_2\right)^2$ = Momento estático de la sección del alma referido al eje neutro condicionante del diseño Y-Y, en (mm^3) .

Lo presentado de la NCh 1198 hasta este punto, habla de las verificaciones de tensiones para elementos estructurales. Luego, acerca de las deformaciones, se menciona que además de considerar la deformación por flexión, los elementos compuestos, sometidos a flexión, deben

considerar también el efecto de corte. Así entonces, la norma entrega una expresión para estimar el aporte de la deformación por corte, que se muestra a continuación.

$$\delta_{Q_{max}} = \frac{M_{max}}{G \cdot A_a} \cdot 10^6 \text{ (mm)} \quad (3.15)$$

En que:

- M_{max} = Momento flector máximo, en $(kN \cdot m)$;
- G = Módulo de corte, en (MPa) ;
- A_a = Sección transversal del alma, en (mm^2) .

Sin embargo, en cuanto a la deformación por flexión, que es la deformación más significativa, no se especifica la expresión que se debe utilizar para estimarla. Se considera entonces la fórmula que se puede deducir para cualquier viga simplemente apoyada con carga distribuida. En este caso, la carga está distribuida en el área de todo el módulo y la resistencia a la deformación está dada por el trabajo en conjunto de todas las vigas y los tableros. Es por eso que para tener una estimación lo más cercana a la realidad posible, la carga se pasa a una carga lineal sobre el ancho del módulo y se consideran las propiedades de inercia y rigidez del tablero completo. Se muestra en la expresión 3.16 la forma en que se calcula dicha deformación, incluyéndolo en esta sección, a pesar de que no es parte de la normativa.

$$\Delta_{flex} = \frac{5 \cdot q \cdot B \cdot L^4}{384 \cdot E_r \cdot I_{ef}} \text{ (mm)} \quad (3.16)$$

En que:

- q = Carga de sollicitación, en (N/mm^2) ;
- B = Ancho del módulo, en (mm) ;
- L = Largo del módulo, en (mm) .

Para el cálculo de todas las tensiones y deformaciones descritas, el diseño de este sistema no calcula para vigas individuales, sino que considera al módulo en su conjunto. Así, a través de las expresiones 3.17 a 3.20, se muestra cómo se definen las propiedades de área y ancho colaborante para un sistema con trabajo conjunto entre vigas y tableros estructurales.

Se definen anchos colaborantes de tableros por tramo, dependiendo de si están asociados a vigas centrales (b_M) o laterales (b_R) según muestra la figura 3.2. Para calcular dichos valores se utiliza la expresión 3.17

$$b' = \left(1,06 - \frac{0,6 \cdot b}{l}\right) \cdot b \quad (3.17)$$

Con b siendo la separación entre vigas y b' la porción de ancho colaborante que sobresale de la viga, según se muestra en la figura 3.2 y l siendo la distancia entre apoyos del sistema.

Así, según como se muestra en la figura 3.2, los valores de b_M y b_R se calculan con las expresiones 3.18 y 3.19 respectivamente.

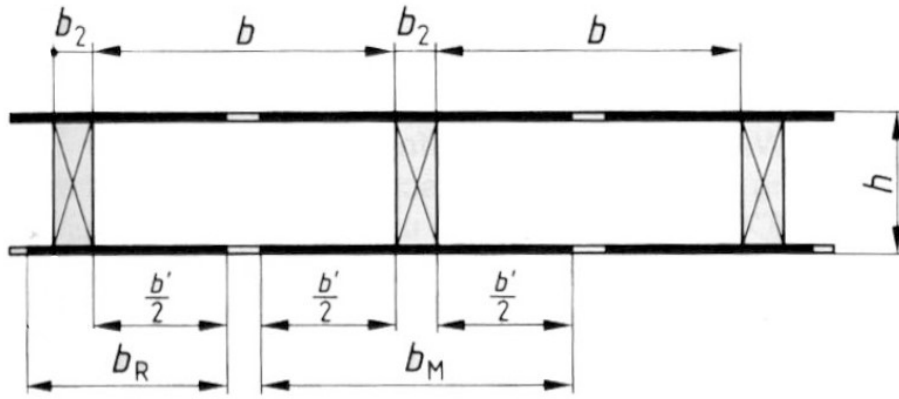


Figura 3.2: Esquema de ancho colaborante de tableros

$$b_M = b' + b_2 \quad (3.18)$$

Con b_2 el ancho de las vigas, como se muestra en la figura 3.2.

$$b_R = \frac{b'}{2} + b_2 \quad (3.19)$$

Vale aclarar que b_R se calcula de esta forma para este caso particular, contrario a lo que se podría entender de la figura 3.2, pues es en la viga lateral donde el tablero termina.

Con esto se definen los anchos colaborantes totales de los tableros de cada módulo, sumando los anchos colaborantes de tableros asociados a vigas centrales y aquellos asociados a vigas laterales según corresponda, como se muestra en la expresión 3.20.

$$b_{colaborante, modulo} = (b_M \cdot N_{vigas\ centrales} - 2) + (b_R \cdot 2) \quad (3.20)$$

Con $N_{vigas\ centrales}$ siendo la cantidad de vigas no laterales del módulo.

9 Uniones en la madera estructural

Como ya se explicó, el sistema funcionará como sistema de vigas compuestas, por lo que se debe tomar en cuenta el capítulo 9 de la NCh 1198, que explica las uniones en la madera estructural y permite calcular y verificar los elementos conectores a utilizar. En el caso de este proyecto, la separación entre los elementos de fijación se determina mediante una propuesta de la misma, para luego simplemente verificar. Por otra parte, la elección de los elementos a utilizar se hace según lo que señalan los catálogos de LP, para sus tableros de OSB, como se muestra en la figura 3.3.

Se identifica entonces que en las interfaces viga - OSB, habrán clavos que deberán resistir movimientos laterales entre ambos elementos. Es decir, una unión de cizalle simple, cuyo mecanismo de falla será uno de los que se muestra en la figura 3.4.

Para determinar cuál será el mecanismo de falla que controle el diseño, la misma norma



Figura 3.3: Especificación de fijaciones a utilizar para tableros de OSB, Catálogo técnico tableros OSB certificado APA

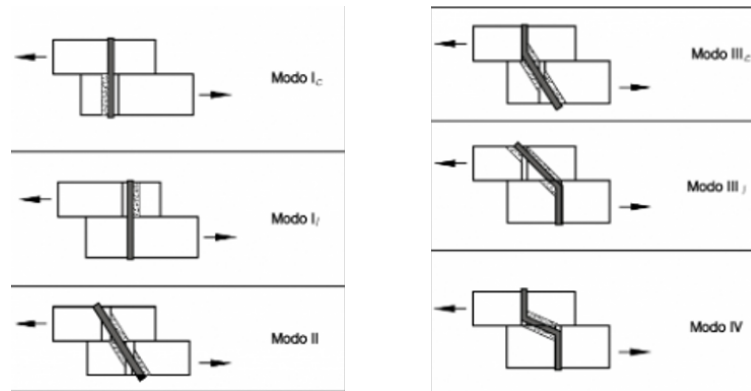


Figura 3.4: Modos de fluencia de elementos de fijación mecánica tipo cilíndrico en cizalle simple, NCh 1198

presenta ecuaciones para calcular la capacidad de carga admisible en extracción lateral de cada uno de los modos de falla de la figura 3.4, que se muestran a continuación, en las expresiones 3.21 a 3.26.

$$\text{Modo } I_c; P_{el} = \frac{D \cdot l_c \cdot R_{ap,c}}{FA} \quad (3.21)$$

$$\text{Modo } I_l; P_{el} = \frac{D \cdot l_l \cdot R_{ap,l}}{FA} \quad (3.22)$$

$$\text{Modo } II; P_{el} = \frac{k_1 \cdot D \cdot l_l \cdot R_{ap,l}}{FA} \quad (3.23)$$

$$\text{Modo } III_c; P_{el} = \frac{k_2 \cdot D \cdot l_c \cdot R_{ap,c}}{(1 + 2 \cdot R_e) \cdot FA} \quad (3.24)$$

$$\text{Modo } III_l; P_{el} = \frac{k_3 \cdot D \cdot l_l \cdot R_{ap,c}}{(2 + R_e) \cdot FA} \quad (3.25)$$

$$\text{Modo IV; } P_{el} = \frac{D^2}{FA} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_{ap,c} \cdot F_{ff}}{3 \cdot (1 + R_e)}} \quad (3.26)$$

En que:

- P_{el} = Capacidad de carga admisible en extracción lateral, en (N);
- $k_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2 \cdot (1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 \cdot R_e^3 - R_e \cdot (1 + R_t)}}{1 + R_e}$;
- $k_2 = -1 + \sqrt{2 \cdot (1 + R_e) + \frac{2 \cdot F_{ff} \cdot (1 + 2 \cdot R_e) \cdot D^2}{3 \cdot R_{ap,c} \cdot l_l^2}}$;
- $k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + R_e)}{R_e} + \frac{2 \cdot F_{ff} \cdot (2 + R_e) \cdot D^2}{3 \cdot R_{ap,c} \cdot l_l^2}}$;
- $R_e = \frac{R_{ap,c}}{R_{ap,l}}$;
- $R_t = \frac{l_c}{l_l}$;
- l_c = Longitud de apoyo del medio de unión en la pieza principal, en (mm);
- l_l = Longitud de apoyo del medio de unión en la pieza lateral, en (mm);
- FA = Factor de ajuste, dependiente del modo de fluencia que se evalúa;
- $R_{ap,c}$ = Resistencia de aplastamiento del vástago en el madero principal, en (MPa);
- $R_{ap,l}$ = Resistencia de aplastamiento del vástago en el madero secundario, en (MPa);
- F_{ff} = Tensión de fluencia en flexión del acero, en (MPa);
- D = Diámetro nominal del medio de unión, en (mm).

Para el presente proyecto, se identifican como piezas laterales, los tableros de OSB y como maderos principales, las vigas. Así, la NCh 1198 muestra también que la tensión admisible de aplastamiento en las paredes de los agujeros, para tableros de hebra orientada (OSB), es de $30 MPa$. De igual forma, explica que para clavos y tirafondos con diámetro nominal menor que $6,4 mm$, la resistencia de aplastamiento se calcula en función de la densidad anhidra media (ρ_o), expresada en kg/m^3 (dada en el anexo E de la misma norma) con la expresión 3.27.

$$R_{ap} = 115 \cdot (\rho_o/1000)^{1,84} \quad (MPa) \quad (3.27)$$

Por otra parte, aunque no son elementos que influyan en la respuesta estructural del sistema, se deben verificar también los elementos de fijación que sostienen los distanciadores al sistema estructural y los elementos que sostienen los tableros de yeso cartón a los distanciadores.

Los distanciadores son piezas de madera aserrada que presentan solicitaciones de tracción al sistema estructural compuesto por vigas y tableros. Por lo tanto, se sostendrán a través de tornillos, cuya capacidad admisible de carga a extracción directa se calcula según el punto 9.6.3.2.1 de la NCh 1198. Allí se explica que la profundidad de atornillado en el madero principal (p_r) debe ser mayor que 4 veces el diámetro y menor que 12 veces el diámetro y que si el eje de la extracción directa es normal a las fibras de la madera, la capacidad se calcula según la expresión 3.28.

$$P_{ed,ad} = 3 \cdot p_r \cdot D \cdot 10^{-3} \quad (3.28)$$

En que:

- $P_{ed,ad}$ = Carga admisible de extracción directa, en (kN);
- D y p_r = Diámetro y profundidad de atornillado en el madero principal respectivamente, según se muestra en la figura 3.5, en (mm).

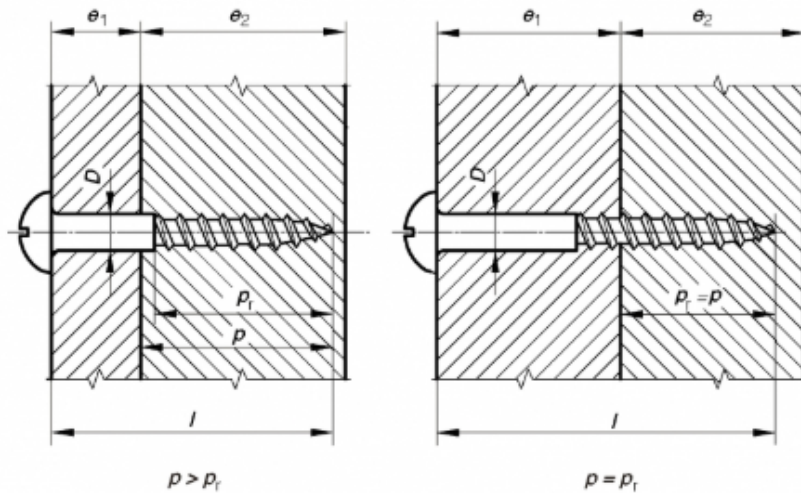


Figura 3.5: Parámetros para calcular carga admisible de tornillos, NCh 1198

NCh 1537: Diseño estructural - Cargas permanentes y cargas de uso

4 Cargas permanentes

El capítulo 4 de la NCh 1537 explica que la determinación de cargas permanentes para diseñar, se hace con los pesos reales de los materiales y elementos de construcción, según los valores dados en los anexos A y B de la misma norma. En el caso de este diseño, se utilizan los valores entregados por la norma solo en caso que los proveedores de los materiales que componen el sistema de entrepiso no cuenten con el dato del peso propio en fichas técnicas o catálogos de su producto.

5 Cargas de uso de piso

La norma especifica que los pisos deben ser diseñados considerando el efecto más desfavorable originado por una o más de las cargas que se señalan a continuación:

a) Cargas de uso para diseño de edificios deben ser mínimo las especificadas en la tabla 4 de la norma, que para lo concierne a este proyecto es en edificios tipo vivienda:

- 2 kPa para áreas de uso general
- 2 kPa para dormitorios y buhardillas habitables
- 3 kPa para balcones con no más de 10 m^2

- 1,5 kPa para entretechos con almacenaje

b) Tabiquerías móviles deben ser considerados con un peso de a lo menos 0,7 kN/m^2 , al menos que la carga de uso especificada sea mayor o igual que 4 kN/m^2 .

c) Este punto habla de la consideración que se le debe dar a las cargas concentradas de la Tabla 4 de la norma. Sin embargo, este proyecto no considera cargas concentradas, pues la tabla mencionada considera solo las cargas distribuidas ya mencionadas para pisos de viviendas, no cargas concentradas.

8 Reducción de cargas de uso para pisos

A pesar de que la norma permite reducir las cargas de uso para el diseño, el criterio que lo permite depende del área tributaria y de un factor de reducción dado por el tipo de elemento estructural. De los elementos estructurales mencionados en la norma, se podría encasillar el diseño de este proyecto como sistema de vigas o directamente como una losa. Con esto, a partir de la fórmula entregada por la norma para reducir las cargas, los valores de las áreas tributarias son demasiado pequeños como para reducir las cargas, por lo que este proyecto no considera reducción de cargas.

3.4.3. Normativa estructural europea

EN 1995-1-1: Eurocode 5 : Design of timber structures - Part 1-1: General - common rules and rules for buildings

De la norma europea para construcción en madera, se considera la sección 7, que habla sobre los estados límites de serviciabilidad y en particular sobre los casos de deformación de vigas y vibraciones de entrepisos.

En cuanto a las deformaciones máximas, vale la pena destacar que la norma europea propone una deformación máxima final, de entre $L/250$ y $L/350$, que se condice con la deformación máxima de $L/300$ que exige la norma chilena.

Sin embargo, el tema de la norma europea que se toma en cuenta en este proyecto, dado que la norma chilena no contiene información al respecto, es el de vibraciones. Esto porque la rigidez del elemento y sus vibraciones es uno de los puntos importantes a considerar en un sistema de entrepiso que se pueda utilizar en edificios habitacionales de cualquier parte del mundo.

La norma europea contiene requerimientos estructurales para cumplir con las condiciones de confort de un entrepiso de uso habitacional, cuya frecuencia fundamental sea mayor a 8 Hz . Para ello, propone una fórmula de cálculo de la frecuencia natural de un entrepiso rectangular con sus 4 lados simplemente apoyados, que se presenta a continuación.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad (3.29)$$

En que:

- m = masa por unidad de área, en (kg/m^2) ;
- l = Distancia entre apoyos, en (m) ;
- $(EI)_l$ = Rigidez del sistema en el eje perpendicular a la dirección de las vigas, en (Nm^2/m) .

Para los casos en que la frecuencia fundamental calculada sea menor a 8 Hz, la norma no tiene un sistema o metodología de cálculo, mientras que para aquellos sistemas de entrepiso con frecuencia fundamental mayor a 8 Hz, se exige lo siguiente.

$$\frac{\omega}{F} \leq a \text{ (mm/kN)} \quad (3.30)$$

$$\nu \leq b^{(f_1 \zeta^{-1})} \text{ (m/(Ns}^2)) \quad (3.31)$$

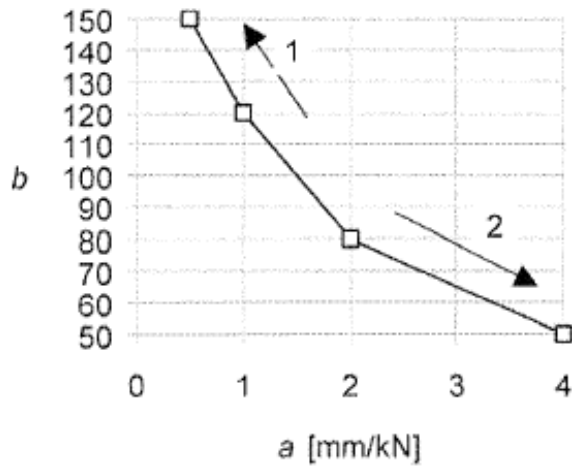
En que:

- ω = Máxima deformación vertical instantánea causada por una carga F vertical, estática y concentrada, aplicada en cualquier punto del piso, considerando la distribución de la misma en el sistema, determinada según la expresión 3.33;
- ν = Respuesta de la velocidad al impulso unitario, es decir, el valor máximo inicial de la velocidad de vibración vertical, en m/s , causado por un impulso unitario ideal (1 Ns) aplicado en el punto del piso que entrega una mayor respuesta, determinada según la expresión 3.35;
- ζ = Coeficiente de amortiguación modal;
- a y b = Valores determinados por la norma según la figura 3.6, que se puede escribir analíticamente como:

$$b = \begin{cases} 180 - 60 \cdot a & \text{para } a \leq 1 \\ 160 - 40 \cdot a & \text{para } 1 \leq a \leq 2 \\ 110 - 15 \cdot a & \text{para } 2 \leq a \leq 4 \end{cases} \quad (3.32)$$

A diferencia de los demás parámetros que se restringen para cumplir con la condiciones de confort en cuanto a las vibraciones, para calcular la deformación que se indica en la expresión 3.30, la norma europea no entrega fórmula o expresión alguna. Así entonces, deja a criterio del diseñador la forma de calcular dicha deformación, tal que se considere la distribución de la carga en el sistema. Sin embargo, como se explica en un documento de la cooperación europea en ciencia y tecnología [20], cada país dentro de la unión europea tiene sus propios anexos nacionales que en algunos casos, entregan metodologías de cálculo para la expresión 3.30.

De entre las metodologías que se explican en el documento recién mencionado, se opta por la metodología desarrollada en el anexo nacional británico e irlandés, por tener un desarrollo sencillo de rastrear y explicar. Otro motivo para utilizar esta metodología es que de acuerdo al libro “Estructuras de Madera. Bases de Cálculo”, que tiene como objetivo enseñar cómo se



Key:
 1 Better performance
 2 Poorer performance

Figura 3.6: Parámetros a y b para cálculo de vibraciones, EN 1995-1-1

calcula y exponer el soporte teórico para entender todo el proceso del proyecto de cálculo en madera [3], dicha metodología se enseña también a estudiantes y profesionales interesados en el cálculo de estructuras de madera en España.

Así entonces, toda la información contenida en las expresiones 3.33 y 3.34, que es la utilizada para calcular la restricción 3.30, es tomada del anexo nacional británico, a través de la explicación que se encuentra en el libro “Estructuras de Madera. Bases de Cálculo”.

$$\frac{\omega}{F} = k_{dist} \cdot k_{fv} \cdot \frac{l^3}{48 \cdot (EI)_{viga}} \quad (3.33)$$

En que:

- k_{dist} = Factor que toma en cuenta la distribución de la carga a las vigas adyacentes, determinado según la expresión 3.34;
- k_{fv} = Factor de amplificación de la flecha por efecto de la deformación debida al corte, considerado 1,05 para vigas de madera maciza simplemente apoyadas;
- $(EI)_{viga}$ = Rigidez a la flexión de cada viga, en $(N \cdot mm^2)$.

$$k_{dist} = \max \left\{ \begin{array}{l} k_{strut} \cdot [0,38 - 0,08 \cdot (\frac{14 \cdot (EI)_b}{s^4})] \\ 0,3 \end{array} \right. \quad (3.34)$$

En que:

- k_{strut} = Coeficiente que depende del arriostramiento transversal, 0,97 para vigas de madera maciza que tienen rigidez transversal garantizada;
- $(EI)_b$ = Rigidez a la flexión equivalente del entrepiso en el eje paralelo a las vigas, en $(N \cdot mm^2/m)$;

- s = Separación entre las vigas, en (mm)

Finalmente, el valor de ν , para un elemento rectangular de dimensiones $b \times l$ con sus 4 lados simplemente apoyados, se determina según se muestra en la expresión 3.35.

$$\nu = \frac{4(0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{mbl + 200} \quad (3.35)$$

En que:

- n_{40} = Número de modos de primer orden con frecuencias de hasta 40 Hz, determinado por la expresión 3.36;
- b = Ancho del sistema, en (m);
- m = Masa por unidad de área del sistema, en (kg/m^2);
- l = Distancia entre los apoyos del sistema, en (m).

$$n_{40} = \left[\left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \cdot \left(\frac{b}{l} \right)^4 \cdot \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right]^{0,25} \quad (3.36)$$

Donde $(EI)_b$ es la rigidez a la flexión equivalente, en Nm^2/m , del entrepiso, en el eje paralelo a las vigas, con $(EI)_b < (EI)_l$.

3.4.4. Normativa para cálculo térmico

Se evalúa también el comportamiento térmico del sistema, a través de la NCh 853 - Acondicionamiento térmico - Envoltente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas, que describe los procedimientos para calcular el comportamiento de un sistema y asegurar que cumpla con los requerimientos térmicos establecidos en la O.G.U.C.

Para ello se consideran los conceptos de conductividad térmica, resistencia térmica y transmitancia térmica. La conductividad (λ) consiste en la cantidad de calor en condiciones estacionarias que pasa en la unidad de tiempo por la unidad de área, cuando se establece una diferencia de temperatura unitaria a ambas caras del elemento y se mide en ($W/m \cdot k$). La resistencia térmica (R), es la oposición al paso del calor que presentan los materiales de construcción, se expresa en ($m^2 \cdot k/W$). Por último, la transmitancia térmica (U) es el flujo de calor que pasa por la unidad de área de un elemento y por grado de diferencia entre ambos lados del mismo, se expresa en ($W/m^2 \cdot k$). Así, la conductividad es una propiedad de los materiales, mientras que la resistencia y la transmitancia dependen tanto de las características intrínsecas del material, como del espesor de las capas que se utilicen y se calculan con las expresiones 3.37 y 3.38.

$$R = \frac{e}{\lambda} (m^2 \cdot k/W) \quad (3.37)$$

Donde la variable e corresponde al espesor del material, expresado en metros.

$$U = \frac{1}{R} (W/m^2 \cdot k) \quad (3.38)$$

Si bien estas expresiones son para cada material en particular, para calcular las propiedades de un sistema completo, simplemente se calculan las resistencias de cada capa y se suman, para luego calcular la transmitancia total con la expresión 3.38 a partir de la resistencia total.

Otro concepto necesario para calcular la resistencia y transmitancia total de un sistema, es la resistencia de superficie. Se trata de una resistencia térmica adicional que se da siempre, por la capa de aire que está inmediatamente adjunta a la superficie de un elemento que está en contacto con el aire. Su valor depende tanto de la orientación, como del sentido del flujo. En el caso de un flujo horizontal (un muro), se distingue solo entre resistencia de superficie exterior (R_{se}) y resistencia de superficie interior (R_{si}), pero si el flujo es vertical, depende también de si el flujo es ascendente, como sería el caso de una techumbre, o descendente, si se estuviera analizando un piso ventilado (asumiendo en ambos casos que la temperatura es más alta al interior que al exterior). Este valor debe ser siempre sumado a las resistencias de los materiales para calcular la resistencia total y luego la transmitancia de un sistema.

Sin embargo, esta metodología debe complementarse al considerar un elemento no homogéneo en toda su extensión, como lo es un envigado con aislante entre medio. A diferencia de lo que sería una losa tradicional, el sistema que se diseña en este proyecto debe analizarse considerando porciones del área total con vigas y otras porciones con aislante en lugar de las vigas. Para ello, simplemente se calculan las transmitancias de cada una de esas zonas (con vigas y con aislante) y se ponderan de acuerdo a la porción de área que cubren para calcular la transmitancia ponderada.

La importancia de evaluar el comportamiento térmico, está en que la solución de entrepiso diseñada podría ser utilizada en pisos ventilados o como techumbre. A diferencia de los entrepisos utilizados como elementos separadores de unidades, la normativa nacional, a través de la O.G.U.C. sí le exige una transmitancia máxima a pisos ventilados y techumbres según la zona geográfica de la construcción, como se muestra en la tabla 3.6

Tabla 3.6: Transmitancias máximas exigidas por la O.G.U.C. (W/m^2K)

Zona	Pisos ventilados	Techumbres
1	3,6	0,84
2	0,87	0,6
3	0,7	0,47
4	0,6	0,38
5	0,5	0,33
6	0,39	0,28
7	0,32	0,25

Si bien en la tabla 2.2 ya se habían expuesto estos valores, en la tabla 3.6 se resumen solo

las transmitancias, pues es ese valor con el que se trabaja para calcular la capacidad térmica del diseño propuesto.

Capítulo 4

Diseño del Elemento de Entrepiso

4.1. Descripción física

El sistema de entrepiso diseñado está compuesto a partir de módulos de dimensiones adaptables, pero diseñadas en un principio, de 4,88 metros de largo, por 1,22 metros de ancho. Estas medidas son tomadas para facilitar la fabricación e industrialización del sistema, pues los tableros a utilizar tienen dimensiones específicas, justamente de 4,88 por 1,22 metros. Esto no solo permite facilitar la producción, sino que también permite disminuir los desechos generados en el proceso, cumpliendo con los objetivos señalados para la construcción industrializada. A continuación se detallan las características y consideraciones de cada componente del diseño, para posteriormente presentar los resultados de los cálculos que respaldan el diseño.

Para facilitar la explicación, en adelante se utilizarán los subíndices “*ejemplo₁*”, “*ejemplo₂*” y “*ejemplo₃*” para identificar las propiedades del tablero superior, del envigado y del tablero inferior, respectivamente. Además, se utiliza como nomenclatura para las propiedades en el sentido transversal a las vigas, un apóstrofe (ejemplo’).

4.1.1. Composición del sistema

A continuación, la imagen 4.1 presenta una vista lateral de un módulo materializado para ensayo. En dicha imagen, se pueden identificar todos los elementos que son detallados en la siguiente sección.



Figura 4.1: Módulo del sistema

Donde:

- A Tablero de OSB no estructural, cara superior del sistema, puede recibir distintos tipos de pavimento;
- B Membrana acústica de caucho;
- C Tablero estructural OSB superior;
- D Envigado estructural;
- E Tablero estructural OSB inferior;
- F Separador de madera aserrad.

Además, se presentan planos que muestran la adaptación de las medidas que se presentan en el cálculo a las condiciones de armado de un módulo, considerando juntas de dilatación de 3 mm para los tableros de OSB (figura 4.2) y un traslape de los elementos que van en la parte superior (figura 4.3), observable también en la figura 4.1.



Figura 4.2: Vista en planta de plano de módulo diseñado

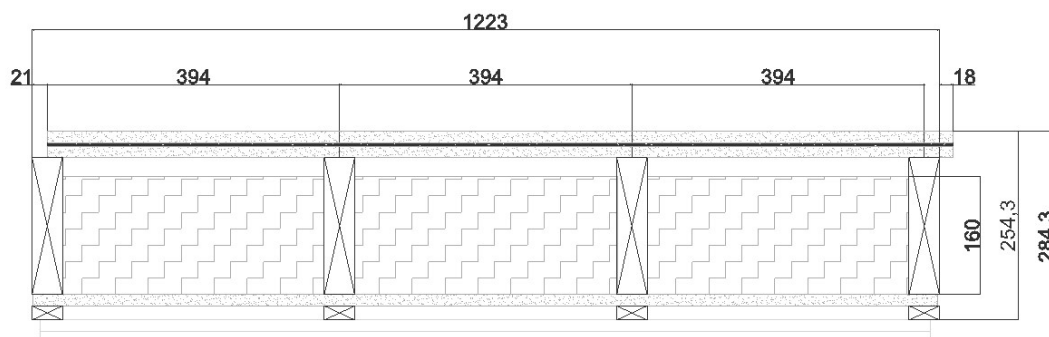


Figura 4.3: Corte de plano de módulo diseñado

Envigado

Las vigas utilizadas para cubrir la luz de 4 metros son de madera aserrada estructural, cepillada, de escuadrías de 2x8 pulgadas, o 41 mm de ancho por 185 mm de alto, con un largo de viga de 4,8 metros, dispuestas cada 407 mm para efectos de cálculo. En cuanto al grado estructural, se consideran vigas de grado C24, que como se explicó en la sección 3.3.1, es un producto desarrollado por CMPC, por lo tanto disponible en el mercado chileno. Las tensiones admisibles y módulos de elasticidad se presentan en la tabla 3.5.

Para el cálculo del peso propio y la masa por unidad de área, se considera que las piezas tienen una densidad de 513 kg/m^3 , dato que indica la NCh 1537 en su anexo A, como densidad de masa para el Pino Insigne. La cifra considerada difiere de las densidades que se pueden calcular a partir de los catálogos comerciales de madera estructural (al rededor de 610 kg/m^3 por ejemplo en catálogos de Arauco) y difiere también de la densidad normal que indica la NCh 1198, de 476 kg/m^3 , pero al haber varias fuentes de las cuales sacar esa información, se ha optado por tomar el valor que entrega la norma dedicada a especificar las cargas.

En el sentido transversal a las vigas (sentido corto de los módulos), se utilizan cadenetras que ayudan a rigidizar y estabilizar el elemento, especialmente en la etapa de construcción del mismo. Estas están hechas de las mismas piezas que las vigas principales, pero espaciadas cada 488 mm y dispuestas entre las vigas. Dicha medida viene dada por la exigencia que se impone a los tableros estructurales certificados APA, donde la restricción depende del espesor del tablero. Como en este caso se utilizan tableros de 15,1 mm (como se explica detalladamente más adelante), al ser utilizados en pisos, requieren apoyos, cada 20 pulgadas o 508 mm aproximadamente.

Las dimensiones de las vigas mencionadas significan una sección transversal de 7.585 mm^2 y aportan una inercia de 21.633.052 mm^4 cada una. Sin embargo, dado que el sistema considera una colaboración entre vigas y tableros para calcular las propiedades equivalentes del módulo completo, se calculan las áreas e inercias equivalentes de cada componente del sistema, siendo para el caso de las vigas $A_2 = 30.340 mm^2$ e $I_2 = 86.532.208 mm^4$ en el sentido principal del sistema. En cuanto al aporte que hace el envigado al comportamiento del sistema en el sentido corto, se considera el aporte en cuanto a área e inercia por metro de ancho, como $A'_2 = 15.543 mm^2$ e $I'_2 = 44.330.025 mm^4$. Además, considerando los espaciamientos y densidades mencionadas, las vigas longitudinales le aportan al sistema una masa de 9,73

kg/m^2 y las cadenetras transversales, $7,97 kg/m^2$.

Tableros estructurales

Los tableros que cumplen un rol estructural en el sistema son tableros de OSB de $15,1 mm$ de espesor, $1,22$ metros de largo y $4,88$ metros de largo. Están dispuestos a lo largo de los módulos, en el mismo sentido que las vigas principales, con las cadenetras como apoyos transversales. Los tableros se disponen por ambos lados (superior e inferior) del envigado, a través de conectores que permiten que los tableros aporten a la inercia del sistema.

A través de las expresiones 3.17 a 3.20 se obtienen los valores de los anchos colaborantes de cada componente del sistema en el sentido longitudinal, que se calculan por módulo, es decir, se determinan cuántos milímetros de ancho trabajan para resistir cargas, deformaciones y disminuir vibraciones. Así, en cuanto al cálculo del sistema, se considera que el ancho colaborantes de ambos tableros corresponde a los $1220 mm$ que tienen los mismos. Esto porque el cálculo desarrollado siguiendo las expresiones 3.17 a 3.20, da un resultado mayor a $1220 mm$, que físicamente no es posible. Por otro lado, en el sentido transversal a las vigas, se hacen los cálculos considerando un ancho unitario de un metro, donde se considera todo el metro de ancho del tablero.

Así, considerando estos anchos colaborantes, se calculan las áreas y momentos de inercia de cada uno de los tableros en el sentido principal, con $A_1 = A_3 = 18.422 mm^2$ e $I_1 = I_3 = 350.033 mm^4$. A su vez, en el otro eje, se trabaja con $A'_1 = A'_3 = 15.100 mm^2$ e $I'_1 = I'_3 = 286.913 mm^4$.

Al no existir una estandarización de los tableros estructurales en Chile de donde se puedan obtener las propiedades mecánicas de una fuente confiable, los módulos de elasticidad se han obtenido por dos fuentes distintas, tomando el peor de los casos para cada uno. Por otro lado, es necesario conocer también las tensiones admisibles de flexión, tracción y compresión, para las cuales se ha encontrado solo una fuente confiable para cada valor.

Una de las fuentes consideradas, es el catálogo técnico para tableros estructurales certificados APA que presenta LP Chile para sus productos, que corresponde a los tableros ensayados en Estado Unidos, pero traspasados a unidades del sistema internacional. Dichos valores están expuestos la figura D.1 en el apéndice de este informe. Así, presentan en primer lugar, una relación entre el espesor de los tableros y la máxima separación entre los apoyos necesarios, que es la característica a la que están asociadas las propiedades mecánicas. En este caso, como los tableros son de $15,1 mm$ de espesor, entran en los rangos de 20 pulgadas ($508 mm$) entre los apoyos, si son utilizados como elementos de piso. Asociados a espaciamientos entre apoyos de 20 pulgadas, las tablas mencionadas y expuestas en la figura D.1, entregan características por unidad de ancho, que se resumen en la tabla 4.1 (solo se muestran los datos incumbentes para este proyecto).

Tabla 4.1: Propiedades tableros OSB, según catálogos de LP

Rigidez a la flexión sentido principal $EI (N \cdot m^2/m)$	Rigidez a la flexión sentido secundario $EI' (N \cdot m^2/m)$	Resistencia a la compresión $F_c A (N/m)$	Resistencia a la tracción $F_t A (N/m)$
1.977	381	61.278	42.311

A partir de estos datos y calculando las áreas e inercias por unidad de ancho de los tableros, se calculan los módulos de elasticidad (EI/I) y (EI'/I'), tensiones admisibles de compresión ($F_c A/A$) y tensiones admisibles de tracción ($F_t A/A$). Con esto se llega a los resultados presentados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Propiedades calculadas de tableros OSB, según catálogos de LP

Módulo de elasticidad sentido principal $E (MPa)$	Módulo de elasticidad sentido secundario $E' (MPa)$	Tensión admisi- ble compresión $F_c (MPa)$	Tensión admi- sible tracción $F_t (MPa)$
6.890	1.328	4,06	2,80

Por otro lado, se tomaron en cuenta también las propiedades que contiene la norma alemana para el diseño de estructuras de madera, DIN 1052-2004, para OSB de clases OSB2 y OSB3, que son las clases de menor calidad (es decir, el peor de los casos). Dichos valores son presentados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Propiedades de tableros OSB, según DIN 1052-2004

Módulo de elasticidad senti- do principal $E (MPa)$	Módulo de elasticidad senti- do secundario $E' (MPa)$	Tensión admisible flexión $F_f (MPa)$
5.000	2.000	16,4

Como se mencionó anteriormente, se comparan aquellos valores que están en las tablas 4.2 y 4.3 para determinar el valor de módulo de elasticidad a considerar. A su vez, en las mismas tablas se presentan los valores de tensiones admisibles a utilizar, que se resumen en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Propiedades de tableros OSB consideradas para el cálculo

$E (MPa)$	$E' (MPa)$	$F_f (MPa)$	$F_c (MPa)$	$F_t (MPa)$
5.000	1.484	16,4	4,06	2,80

Medios de unión

Los medios de unión entre las vigas y los tableros estructurales son clavos, dispuestos regularmente cada 8 *cm*.

Los clavos a utilizar se determinan según la figura 3.3, del catálogo técnico de LP, donde se especifica el tipo de clavo necesario para fijar los tableros de OSB según su espesor y la

estructura que los soportará. Así, para fijar tableros de 15,1 *mm* de espesor a una estructura de madera, los clavos a utilizar deben ser estriados y helicoidales, de 2,5" (65 *mm*), clavados a no menos de 1 *cm* del borde y distanciados cada 15 *cm* como máximo en el perímetro y cada 30 *cm* como máximo en apoyos interiores. Se asume también para el cálculo, una tensión de fluencia en flexión del acero de 420 (*MPa*).

Por otro lado, los separadores son fijados a través de tornillos que atraviesan los tableros de OSB y se afirman en las vigas o cadenetras. Para ello se evalúan los posibles tornillos a partir del catálogo de tornillos de cabeza avellanada de Rothoblaas, donde los tornillos se clasifican según diámetro, desde 3,5 *mm*. Dada la baja carga que debe resistir, se consideran los tornillos de menor diámetro. Sin embargo, como se explicó en la sección 3.4.2, los tornillos solicitados a extracción directa, deben estar atornillados en el madero principal, con una profundidad de entre 4 y 12 veces el diámetro, por lo que los tornillos utilizados deben medir por lo menos 48 *mm* de largo para atravesar los 34 *mm* de separadores y OSB, y luego atornillarse en la madera principal por lo menos 14 *mm*. Así, se escogen tornillos de 3,5 *mm* de diámetro y 50 *mm* de largo.

Por último, los tornillos que afirman las dos placas de yeso-cartón a los separadores (no incluidas en la figura 4.1 pero explicadas en el siguiente punto) son tornillos cabeza trompeta punta aguda rosca fina, #6 según recomendaciones del catálogo de Pizarreño y de 2 pulgadas de largo para cumplir con las condiciones de capacidad a extracción directa.

Elementos no estructurales

Además de los tableros estructurales, el sistema es completado por otros elementos que no influyen en el comportamiento estructural del elemento, sino que en el comportamiento frente al fuego y en la aislación acústica que deben ser asegurados por el sistema de entepiso.

Aquellos elementos cuya principal función dentro del sistema es acústica, están en la cara superior del mismo y son, en primer lugar, inmediatamente encima del tablero de OSB estructural superior, una membrana acústica de caucho de 800 *kg/m*³ de densidad y 5 *mm* de espesor, cubierta por otro tablero (no estructural) de OSB de 15,1 *mm* de espesor. Además, para evitar que el espacio que queda entre las vigas actúe como caja de resonancia para las vibraciones, en ese espacio se coloca lana de vidrio de 160 *mm* de espesor y una densidad de 11 *kg/m*³. Estos componentes actúan agregándole masa al sistema, pero en particular el caucho tiene la función de desacoplar los componentes del sistema y de no permitir que las vibraciones puedan viajar directamente a través de materiales más homogéneos como lo son los tableros de OSB y las vigas de madera.

Por otro lado, los elementos considerados para cumplir con la resistencia al fuego, son aquellos que están por debajo del OSB estructural inferior y son dos placas de yeso-cartón RF de 15 *mm* de espesor, separadas del OSB por medio de separadores de madera aserrada de 2x1 pulgadas. La colocación de los tableros de yeso cartón por debajo de la estructura resistente responde a que la resistencia al fuego debe ser asegurada para que no haya un traspaso de un departamento inferior a uno superior, considerando que el fuego y el calor tienen tendencia a subir. Para optimizar el funcionamiento de estos elementos frente al fuego

y para que tengan también una función acústica, la colocación de los mismos debe considerar un traslape entre las dos capas, es decir, no deben estar alineadas.

Los separadores mencionados en el párrafo anterior tienen la función de soportar los tableros de yeso-cartón, pero también están pensados para que por el espacio que dejan pasen instalaciones. Así, la orientación de estos puede ser en cualquiera de las direcciones del sistema (alineados con las vigas o con las cadenas).

En cuanto a la metodología de construcción del sistema, no es conveniente colocar los tableros de yeso en fábrica. La principal razón de esto es la fragilidad de este material, que haría muy probable la fractura del mismo en el proceso de transporte. Además, los mencionados separadores, que son los elementos que quedan más abajo en el sistema, facilitan la manipulación de cada módulo, al dejar un espacio libre debajo del mismo.

4.2. Factores de modificación y tensiones de diseño

Para calcular las tensiones de diseño de los elementos de madera aserrada, se consideran algunos factores de modificación ya mencionados en el capítulo anterior. Estos se multiplican por los valores de tensión admisibles de la tabla 3.5 de acuerdo a la sección 7.2 de la NCh 1198, que explica el dimensionamiento de piezas estructurales. Se mencionan a continuación los factores de modificación considerados para el cálculo de las distintas tensiones de diseño, donde cada uno de los puntos es la explicación de un factor de modificación:

- El primero de estos es el factor de modificación por duración de la carga, calculado según la expresión 3.1, considerando un tiempo de duración de la carga de 10 años, es decir, considerándola como una carga de duración normal, por lo que para todos los cálculos, es igual a 1. Este factor de modificación se considera en el cálculo de todas las tensiones admisibles incumbentes a este análisis (flexión, compresión paralela, tracción paralela y cizalle).
- Dado que la separación entre las vigas es menor a 610 *mm*, el factor de modificación por trabajo conjunto de las mismas toma un valor de 1,15, como lo señala la expresión 3.2. Este valor modifica solo la tensión admisible de flexión.
- Las vigas utilizadas en el envigado son de grado C24, con una altura de 185 *mm*, por lo que el factor de modificación por altura de la viga, se calcula según la expresión 3.3, dando un valor de 0,87. Se aplica este factor de modificación al cálculo de la tensión de diseño en flexión y en tracción paralela.
- El factor de modificación por concentración de tensiones, que se utiliza para calcular la tensión de diseño en tracción paralela, permite tomar en consideración las perforaciones o vaciados en zonas traccionadas, influyendo solo sobre el valor de la tensión de diseño en tracción paralela. Toma un valor de 0,8 para el presente caso de perforaciones de clavos en madera aserrada, según la tabla 19 de la NCh 1198.

Por otro lado, las tensiones de diseño de los tableros estructurales que se consideran, son las presentadas en la tabla 4.4, que como se explicó en la sección 4.1, son los valores más conservadores obtenidos, dada la incertidumbre en la fuente de los datos.

Así, se resumen en las tablas 4.5 y 4.6, los factores de modificación considerados y las tensiones de diseño resultantes para las vigas de madera aserrada, a partir de las expresiones 3.6 (flexión en el borde traccionado), 3.7 (compresión paralela), 3.8 (tracción paralela), 3.9 (cizalle).

Tabla 4.5: Factores de modificación considerados para madera aserrada

Factor de modificación	Propiedades que modifica	Valor
Por duración de la carga (K_D)	Flexión, compresión paralela, tracción paralela y cizalle	1
Por trabajo conjunto (K_C)	Flexión	1,15
Por altura de la viga (K_{hf})	Flexión y tracción paralela	0,87
Por concentración de tensiones (K_{ct})	Tracción paralela	0,8

Tabla 4.6: Tensiones de diseño calculadas para madera aserrada grado C24

Tensión de diseño	Valor (MPa)
Flexión en el borde traccionado ($F_{ft,dis}$)	9,26
Compresión paralela ($F_{cp,dis}$)	8,00
Tracción Paralela ($F_{tp,dis}$)	3,25
Cizalle ($F_{cz,dis}$)	1,1

4.3. Cargas y solicitaciones

Las cargas solicitantes del sistema corresponden a aquellas del peso propio de los materiales, más las sobrecargas especificadas en la NCh 1537. En la tabla 4.7 se exponen todas las cargas consideradas para el diseño, detallando en cada caso la fuente de donde se obtienen dichos datos.

Tabla 4.7: Cargas de diseño

Material o carga	Peso unit. (N/m^2)	Fuente
Vigas 185x41 mm @40 cm	95	NCh 1537, Anexo A
Vigas 185x41 mm @49 cm	78	NCh 1537, Anexo A
Distanciadores 19x45 mm @40 cm	11	NCh 1537, Anexo A
OSB home 15,1 mm	108	Catálogo técnico material (Fig. E.1)
Membrana de caucho 800 kg/m ³ 5 mm	44	Ficha técnica material
Lana de vidrio 11 kg/m ³ 160 mm	11	Ficha técnica material
Yeso Cartón RF 15 mm	117	Ficha técnica material (Fig. E.2)
Sobrecarga de uso	2000	NCh 1537, tabla 4

Como se mencionó, la tabla 4.7 muestra las cargas unitarias de cada material, pero más precisamente, es el peso unitario de cada capa de cada material. Así entonces, por ejemplo

para los tableros de OSB, que como ya se ha mencionado antes, son 3, la carga unitaria de la tabla 4.7 se multiplica por tres. Lo mismo pasa con los tableros de yeso-cartón que son 2. Por su parte, la sobrecarga especificada por la NCh 1537, es una carga distribuida de 2 kN/m^2 , que corresponde a la carga asignada a viviendas en áreas de uso general, dormitorios y buhardillas habitables.

Sumando todas las cargas de los materiales del sistema, se obtiene una carga de peso propio de 797 N/m^2 .

4.4. Inercia y rigidez del sistema

Como ya se mencionó, la estructura del entrepiso está compuesta por vigas de madera aserrada de 2x8 pulgadas, con tableros estructurales de OSB de 15,1 mm de espesor clavados por arriba y por abajo del envigado. La principal razón estructural de tener los tableros de OSB, es que aumentan considerablemente la inercia y rigidez del sistema, permitiendo que este cumpla con los requerimientos de deformación y vibraciones.

Ya se presentaron, en el punto 4.1, los valores de inercia y rigidez de cada uno de los componentes estructurales, sin embargo, para considerarlos como un sistema, se calculan inercias y rigideces equivalentes o efectivas del sistema. Vale decir que al hablar de rigidez, en términos matemáticos, se está hablando del producto entre el módulo de elasticidad y la inercia del sistema ($E \cdot I$) y lógicamente, mientras mayor es esa cantidad, más rígido, o más difícil de deformar es el sistema.

La inercia efectiva del sistema (I_{ef}), se calcula según la expresión 3.11, presentada en la NCh 1198, para la cual se definen factores γ y n , que están asociados a un módulo de elasticidad referencial E_r . Dicho módulo, presentado en la expresión 3.10, es el que luego se utiliza para determinar la rigidez del sistema, a través de la simple multiplicación entre E_r y I_{ef} .

Se presenta así en la tabla 4.8, cómo varía la inercia y rigidez del sistema con la contribución de los tableros estructurales, donde para comparar las situaciones, se evalúan por metro de ancho.

Tabla 4.8: Colaboración de tableros estructurales en inercia y rigidez por ancho unitario

Componentes	Variable	Cantidad	Variabilidad
Solo envigado	Inercia	$70.928.040 \text{ mm}^4/m$	61 %
Envigado más tableros		$180.378.993 \text{ mm}^4/m$	
Solo envigado	Rigidez	$723.466 \text{ N} \cdot \text{m}^2/m$	20 %
Envigado más tableros		$901.895 \text{ N} \cdot \text{m}^2/m$	

De la tabla 4.8 se observa que la inercia experimenta un crecimiento muy importante, mientras que la rigidez aumenta, pero en una magnitud menor. Esto se debe a que el aumento de inercia responde de manera directa a la geometría, que con los tableros de OSB se ve sustancialmente modificada (y potenciada en este caso) al alejar la masa del centro

de gravedad del sistema. Por otro lado, la rigidez depende directamente de la inercia, pero también del módulo de elasticidad, y en ese punto, como se mostró en la sección 4.1, los tableros de OSB pierden mucho terreno en relación con la madera aserrada (5.000 MPa para tableros vs 10.200 MPa para madera aserrada).

4.4.1. Clasificación de diafragma

Si bien no se aborda como un tema central de este proyecto, se presentan algunas consideraciones de cómo se puede modelar el diseño presentado, en cuanto a su rigidez como diafragma y su consiguiente distribución de las solicitaciones horizontales dentro de los edificios, siguiendo criterios presentados por las instituciones estadounidenses *American Wood Council* y *National Institute of Standards and Technology*.

Las tres clasificaciones posibles para la modelación son de diafragma rígido, semi-rígido y flexible, donde un diafragma rígido distribuye los esfuerzos de corte sobre los muros de corte de forma proporcional a la rigidez de estos últimos (los muros más rígidos reciben mayores solicitaciones). Modelar considerando un diafragma flexible significa que los esfuerzos de corte del edificio se distribuyen sobre los muros de corte según su área tributaria. Finalmente la modelación con diafragmas semi-rígidos significa un complejo análisis basado en la rigidez relativa de muros y diafragmas tomando en cuenta tanto deformaciones de corte como de flexión. Para evitar la complejidad del análisis, se permite hacer un cálculo envolvente, que tome el mayor valor para cada muro de corte dados análisis considerando diafragma rígido y diafragma flexible [1].

Se proponen así las formas de clasificar los diafragmas dentro de una de las tres categorías, según el código *ASCE 7: Minimum design loads for buildings and other structures*. Se puede catalogar un diafragma como flexible si es que cumple con cualquiera de los siguientes criterios prescriptivos [13]:

- Estructuras donde los muros sean marcos arriostrados de acero o compuestos (acero - hormigón), o donde los muros sean de hormigón o albañilería.
- Viviendas uni- o bi-familiares.
- En estructuras de marco liviano, diafragmas estructurales de madera que no tengan una sobrelosa o que tengan una sobrelosa no estructural de hasta 4 cm y donde todos los ejes de muros de corte cumplan con las restricciones de deformación lateral (drift).

Por otro lado, el criterio de cálculo para catalogar un diafragma como flexible es que la deflexión máxima calculada para el diafragma según la expresión 4.1, bajo cargas de sismo sea mayor que dos veces el drift calculado para los muros soportantes de corte del piso inferior. Si esta condición no se cumple, el diafragma puede ser considerado como rígido [1].

$$\delta_{dia} = \frac{5 \cdot \nu \cdot L^3}{8 \cdot E \cdot A \cdot W} + \frac{0,25 \cdot \nu \cdot L}{1000 \cdot G_a} + \frac{\sum(x \cdot \Delta_c)}{2 \cdot W} \quad (4.1)$$

En que:

- δ_{dia} = Deflexión máxima del diafragma, en (in.);
- ν = Esfuerzo de corte unitario sobre diafragmas, en (lbs/ft);
- L = Longitud del diafragma, en (ft);
- E = Módulo de elasticidad de la viga lateral perpendicular a los muros de corte, en (psi);
- A = Sección de la viga lateral perpendicular a los muros de corte, en (in.²);
- W = Ancho del diafragma, en (ft);
- G_a = Rigidez de corte aparente de diafragma, dada según tablas presentados en el documento *Special Design Provisions for Wind and Seismic* [1], en (kips/in.);
- x = Distancia del empalme de las vigas laterales perpendiculares a los muros de corte, al apoyo más cercano, en (ft);
- Δ_c = Separación en el empalme de las vigas laterales perpendiculares a los muros de corte, bajo condiciones esfuerzo de corte unitario, en (in.).

Con esto en cuenta, el sistema presentado en el presente proyecto, podría ser, a priori (considerando después el correspondiente análisis de los muros de corte de la estructura), catalogado y modelado como diafragma flexible bajo el tercer criterio prescriptivo. Si los muros de corte no cumplen con dicho criterio, se puede hacer uso del criterio de cálculo a través de la expresión 4.1. Sin embargo, puede suceder también que el criterio de cálculo sea complicado de corroborar dada la cantidad de parámetros que se deben definir para ello. Si ese es el caso, se debe considerar el diafragma como semi-rígido, y como se mencionó, hacer el análisis tomando en cuenta la rigidez relativa entre diafragma y muros de corte, o bien, tomar el valor envolvente dado por los análisis que consideren diafragma flexible y diafragma rígido respectivamente.

4.5. Verificaciones de diseño

Dado que las condiciones de carga vienen dadas por una sollicitación a flexión, parte importante de las verificaciones de diseño estructurales se calculan a partir del momento flector máximo del sistema. Así, a partir del cálculo que se hace para una viga simplemente apoyada, se calcula el valor del momento flector máximo que exige al sistema considerando peso propio y sobrecarga: $M_{\text{max},PP+SC} = 2,3 \text{ kN} \cdot \text{m}$

4.5.1. Verificación de resistencia

Las verificaciones de resistencia del sistema se hacen comprobando que las tensiones de trabajo calculadas con las expresiones 3.10 y la expresión 3.14, sean menores que las tensiones de diseño de cada elemento sollicitado. Así, se muestran en la tabla 4.9, los valores de las tensiones de trabajo, comparados con los de las tensiones admisibles de diseño correspondientes que se han señalado en las tablas 4.4 y 4.6. Se utiliza la nomenclatura de la figura 3.1 (excepto por el cizalle máximo, que no se muestra en la figura mencionada).

Tabla 4.9: Verificación de resistencias en condiciones de uso

Variable calculada	Tensión de trabajo (MPa)	Tensión de diseño (MPa)
Flexión en borde de tablero comprimido ($f_{f,1}$)	0,2	16,4
Flexión en borde traccionado de viga ($f_{f,2}$)	1,95	9,26
Flexión en borde de tablero traccionado ($f_{f,3}$)	0,2	16,4
Compresión en el centroide de tablero comprimido ($f_{g,1}$)	-0,12	-4,06
Tracción en el centroide de tablero traccionado ($f_{g,3}$)	0,12	2,80
Cizalle máximo en viga ($f_{cz,max}$)	0,12	1,1

Se observa que todas las tensiones de trabajo son ampliamente superadas en todos los casos por las tensiones de diseño de los materiales solicitados, comprobándose una hipótesis mencionada al comienzo del informe, que dice que en este tipo de elementos, no es la resistencia la que domina el diseño, si no que las restricciones de habitabilidad como deformaciones y vibraciones.

En términos de resistencia, falta comprobar que los elementos conectores entre los tableros y las vigas cumplen con el mismo criterio que dichos materiales. Para ello, se calculan las capacidades de carga de extracción lateral de los clavos utilizados (65 mm de largo y 3,1 mm de diámetro) con las expresiones 3.21 a 3.26. Así, se calculan todos los modos de fluencia y se toma el valor más desfavorable para el diseño.

Como se explica en la presentación de las expresiones, hay algunas variables que se deben definir o calcular previamente, como lo son las resistencia de aplastamiento del vástago en los maderos, la longitud de apoyo del medio de unión en los maderos, la tensión de fluencia del acero, los parámetros k_1 , k_2 y k_3 definidos en la norma y el factor de ajuste.

Se muestra en la figura 4.4 a qué se refieren las longitudes de apoyo en maderos principales (l_c) y secundarios (l_l). Luego, considerando la longitud de los clavos (65 mm) y el espesor de los tableros de OSB (15,1 mm), la longitud de apoyo en maderos secundarios es de 15,1 mm y en principales es de 49,9 mm . Existe otro parámetro que se define a partir de las longitudes recién presentadas, que es $R_t = l_c/l_l$ y toma el valor de 3,3.

En cuanto a las resistencias de aplastamiento de los vástagos en los maderos, como se señala en la sección 3.4.2, la NCh 1198 especifica que para tableros de hebra orientada (OSB), la resistencia es de 30 MPa , que correspondería a la resistencia en el madero secundario ($R_{ap,l}$). Por otro lado, la expresión 3.27 permite calcular la resistencia de aplastamiento en la viga, que correspondería al madero principal. Para ello se considera, tal como dice la norma, la densidad anhidra media de la especie maderera, dada en el anexo E de la misma norma, que en este caso es de 450 kg/m^3 . Así, la resistencia de aplastamiento del vástago en el madero principal ($R_{ap,c}$) es de 26,46 MPa . Al igual que en las longitudes, se define un parámetro a partir de las resistencias de aplastamiento, que es $R_e = R_{ap,c}/R_{ap,l}$ y toma el valor de 0,88.

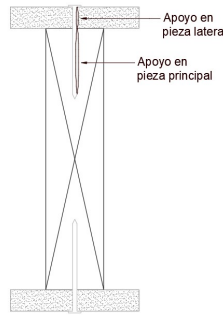


Figura 4.4: Esquema de tableros clavados a viga

El factor de ajuste (FA) que se utiliza para calcular las cargas admisibles de los clavos está dado por la NCh 1198 y depende del diámetro del clavo y del modo de fluencia que se evalúe. Así, para clavos de diámetro menor a $6,4 \text{ mm}$, el FA tiene una forma de calcularse específica para los modos III_c , III_l y IV , que es el resultado de $3,2 \cdot k_\alpha$, con $k_\alpha = 1 + \frac{\alpha_{max}}{360}$. Dado que α_{max} es la máxima desangulación entre la dirección de la fuerza y la dirección de la fibra de cualquier componente de la unión, en este caso es simplemente 0, pues la fuerza que resulta entre los tableros y las vigas al flexionarse el elemento, es en el sentido de sus fibras. Así, $k_\alpha = 1$ y el FA en este caso es 3,2. Luego, se da otro criterio para calcular el FA (aplicable a todos los modos de fluencia), que dice que el FA es igual a otra variable K_d que se define como 2,2 para conectores de diámetro menor a $4,3 \text{ mm}$, por lo que según este criterio, el FA para todos los modos de fluencia sería 2,2. En los casos en que hay dos FA distintos, se considera el caso más desfavorable, quedando entonces que para los modos I_c , I_l y II , el FA es 2,2; mientras que para los modos III_c , III_l y IV , el FA es 3,2. Todos los valores recién expuestos se resumen en la tabla 4.10, además de los parámetros k_1 , k_2 y k_3 y las capacidades calculadas para cada modo de fluencia.

Tabla 4.10: Capacidad de carga de clavos

Parámetro	Valor	
$l_c \text{ (mm)}$	49,9	
$l_l \text{ (mm)}$	15,1	
$R_{ap,c} \text{ (MPa)}$	26,46	
$R_{ap,l} \text{ (MPa)}$	30	
R_t	3,3	
R_e	0,88	
k_1	0,99	
k_2	0,97	
k_3	1,36	
Modo de fluencia	FA	Capacidad de carga admisible (N)
I_c	2,2	1861
I_l	2,2	638
II	2,2	633
III_c	3,2	448
III_l	3,2	182
IV	3,2	188

Se observa que el modo de fluencia III_l es el que tiene la menor capacidad de carga admisible, por lo que es el que se considera como valor de diseño. Dado que el valor calculado corresponde a la capacidad de carga de extracción lateral de un clavo, se puede calcular entonces el espaciamiento entre clavos necesario para que estos puedan soportar la carga de cizalle que se da entre tableros y vigas, determinada por la expresión 3.12. Luego, con la expresión 3.13, que relaciona la carga admisible de los conectores con el cizalle máximo entre viga y tableros, se determina que el espaciamiento requerido entre conectores es de máximo $82,1 \text{ mm}$, por lo que al tenerlos espaciados a 80 mm , se cumple con el requerimiento de resistencia de conectores.

4.5.2. Verificación de deformaciones

De la misma forma que para la resistencia, se muestran a continuación las verificaciones que indican que las deformaciones del sistema ante las cargas solicitantes, son menores que las admisibles. Para ello, se evalúan las condiciones de carga de peso propio solo y de peso propio más sobrecarga, basándose en lo que dice la NCh 1198. Esto es, que vigas de piso para construcciones en general, deben tener una deformación no mayor que $L/360$ cuando se considera solo la sobrecarga y $L/300$ cuando se consideran peso propio y sobrecarga.

Así, se aplican las expresiones 3.15 y 3.16 con las respectivas cargas solicitantes para calcular las deformaciones totales (considerando los efectos de la flexión y del corte) en los casos de solo sobrecarga y de sobrecarga más peso propio. En la tabla 4.11 se resumen las deformaciones admisibles y las calculadas, observándose que las condiciones son ampliamente satisfechas.

Tabla 4.11: Deformaciones admisibles y calculadas

Cargas solicitantes	Deformaciones admisibles		Deformaciones calculadas	
	Valor (mm)	Fracción	Valor (mm)	Fracción
Sobrecarga	11,1	$L/360$	7,4	$L/540$
Peso propio + sobrecarga	13,3	$L/300$	10,4	$L/386$

4.5.3. Verificación de vibraciones

Para la verificación de vibraciones, se sigue simplemente el procedimiento de la norma europea, explicado en la sección 3.4.3. Así, con la expresión 3.29 se calcula la frecuencia fundamental del entrepiso en $10,34 \text{ Hz}$, es decir, mayor que los 8 Hz que exige la norma europea para seguir su procedimiento [7].

Con ello se verifica que el entrepiso cumple con las condiciones 3.30 y 3.31, limitados por los parámetros a y b respectivamente. Como ya se explicó en la sección 3.4.3, la condición 3.30, que le pone límite a la deformación que puede tener un entrepiso frente a una carga puntual, se calcula en este caso utilizando el anexo británico de la norma europea que entrega las expresiones 3.33, para calcular la deformación que se debe limitar ($\frac{\omega}{F}$), y la expresión 3.34,

para calcular el parámetro k_{dist} , que permite tomar en cuenta la distribución de la carga entre las vigas. De esta forma, se calcula que el cociente entre la deformación ω y la carga puntual F es 1,9.

Por otro lado la condición 3.31, que impone una restricción a la velocidad de la respuesta del entrepiso ν , se calcula en primer lugar con la expresión 3.36, que permite conocer el valor de n_{40} para luego introducirlo en la expresión 3.35 que es en definitiva el parámetro que representa la velocidad de respuesta que debe ser restringida y que tiene como valor 0,0067.

Se evalúan entonces los valores de los parámetros a y b como se muestra en la figura 3.6 y en la expresión 3.32. Tomando el parámetro a como 1,9, que es el valor de la expresión a la que le pone límite, con la expresión 3.32 se obtiene que b es igual a 83,8. Finalmente, como indica la expresión 3.31, para determinar el valor que limita a ν , se deben tomar en cuenta la frecuencia fundamental f_1 y el coeficiente de amortiguación ζ (0,02 para este tipo de estructuras [3]), para elevar el parámetro b al valor $(f_1\zeta - 1)$, obteniendo como límite, 0,0298.

Se tiene finalmente que ambas condiciones se cumplen, pues para el caso de la restricción a la deformación por carga unitaria, se tiene que $1,9 \leq 1,9$ y en el caso de la restricción a la velocidad de respuesta, $0,0067 \leq 0,0298$. Además, se cumple con la recomendación que entrega la coordinación europea de ciencia y tecnología, de que el valor de $\frac{\omega}{F}$ no sobrepase los 2 mm/kN [20].

4.5.4. Verificación de resistencia en izaje

El izaje del sistema es un punto que debe ser propuesto y verificado para considerar el diseño como industrializado. Así, se propone un sistema de izaje a través de eslingas u horquillas para grúas. Luego, se hace la verificación de la respuesta a flexión del sistema, pues las condiciones de apoyo son distintas a las de uso.

Flexión

La verificación de flexión del sistema de eslingas propuesto se hace considerando que estas deben ser ubicadas de tal forma que los esfuerzos que se generen sobre el entrepiso no sean superiores a sus capacidades admisibles.

El criterio para elegir los puntos de izaje del sistema se basa en minimizar el esfuerzo solicitante en flexión. Dado que el diseño estructural del sistema es simétrico en cuanto a la resistencia de momento positivo y negativo, se buscará que el peak de momentos positivos y negativos sean iguales. Para calcularlo, se considera que los puntos donde se ubican las eslingas u horquillas son apoyos simples y que el módulo responde como viga en el sentido longitudinal del mismo. Así se determina el momento por tramos a través de la expresión 4.2, que permite calcular los máximos valores de momento flector.

$$M = \begin{cases} \frac{q \cdot x^2}{2} & \text{si } x \leq a \\ \frac{q}{2} \cdot (x^2 - L(x - a)) & \text{si } a \leq x \leq L - a \\ \frac{q}{2} \cdot (x - L)^2 & \text{si } x \geq L - a \end{cases} \quad (4.2)$$

Donde q es la carga lineal distribuida uniformemente a lo largo del módulo (considerado como viga para este cálculo) y vale $0,97 \text{ kN/m}$; x es la distancia desde el borde de donde se comienza a evaluar hasta el punto evaluado; L es el largo total del módulo, 4880 mm ; y a es la distancia desde los bordes del módulo al punto donde se ubican las eslingas.

Con los cálculos explicados, se determina que el punto de izaje más conveniente es con las eslingas a 1015 mm del borde corto del módulo, pues así los momentos flectores llegan casi a los $0,5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ tanto en positivo como en negativo, como se observa en la figura 4.5.

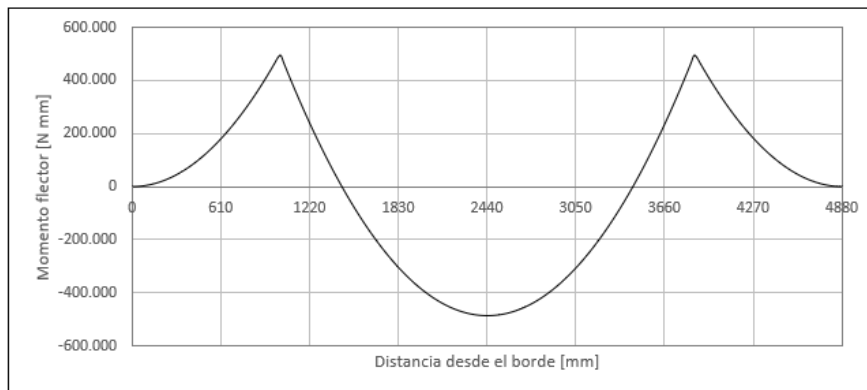


Figura 4.5: Diagrama de momento en condición de izaje

Para poder evaluar la carga que esto significa para la estructura, se evalúan las tensiones de trabajo de manera similar a como se hizo en la sección 4.5.1. Al repetir el análisis para el momento flector máximo que se da en la condición de izaje ($0,49 \text{ kN} \cdot \text{m}$), se obtienen los resultados que se observan en la tabla 4.12.

Tabla 4.12: Verificación de resistencias en condición de izaje

Variable calculada	Tensión de trabajo (MPa)	Tensión de diseño (MPa)
Flexión en borde de tablero comprimido ($f_{f,1}$)	0,04	16,4
Flexión en borde traccionado de viga ($f_{f,2}$)	0,42	9,26
Flexión en borde de tablero traccionado ($f_{f,3}$)	0,04	16,4
Compresión en el centroide de tablero comprimido ($f_{g,1}$)	-0,03	-4,06
Tracción en el centroide de tablero traccionado ($f_{g,3}$)	0,03	2,80
Cizalle máximo en viga ($f_{cz,max}$)	0,03	1,1

Se observa así que todos los valores de tensión de trabajo están muy por debajo de las tensiones de diseño calculadas para el sistema, es decir, la propuesta de izaje presenta sollicitaciones que no complican al sistema. Tomando en cuenta la holgura de la resistencia, se propone que en vez de 1015 *mm*, las eslingas se ubiquen a 1000 *mm* de los bordes (el momento máximo pasa de 0,49 *kN · m* a 0,52 *kN · m* y no varían las cifras significativas de las tensiones de trabajo de la tabla 4.12), para una darle mayor simpleza a la parte práctica y operativa del izaje.

4.5.5. Verificación térmica

Finalmente, se hace la verificación de la capacidad térmica del sistema, para acreditar que no solo se puede utilizar como elemento separador entre unidades al interior de un edificio (caso para el cual no sería necesario este cálculo), si no que también se puede utilizar como piso ventilado y como techumbre.

Para poder desarrollar el cálculo térmico, se deben conocer las conductividades térmicas, que son propias de los materiales y se obtienen a partir de la tabla A.1 de la NCh 853 [6] para materiales como la madera, tableros de OSB y yeso cartón, y de fichas técnicas para materiales que no están en la tabla, como la lana de vidrio. Luego, considerando el espesor de cada material y la conductividad, se calculan las resistencias térmicas de cada componente del sistema con la expresión 3.37, como se muestra en la tabla 4.13. En el caso particular de la membrana de caucho, no se encontró un valor de conductividad confiable para ser usado en el cálculo térmico, por lo que se asume como un elemento sin resistencia térmica. Se incluyen en la tabla, además de los materiales utilizados, los valores de resistencias térmicas dados por la tabla C.3 de la NCh 853 para cámaras de aire y dadas por la tabla 2 de la misma norma para las resistencias térmicas de superficie.

Tabla 4.13: Conductividades y resistencias térmicas de materiales

Material	Conductividad térmica (W/m^2k)	Espesor (m)	Resistencia térmica (m^2k/W)
OSB 15 <i>mm</i>	0,106	0,0151	0,14
Caucho 5 <i>mm</i>	-	0,005	0
Viga 2x8"	0,104	0,185	1,78
Distanciadores 2x1"	0,104	0,025	0,24
Lana de vidrio 11 kg/m^3	0,0426	0,16	3,76
Yeso cartón 15 <i>mm</i>	0,26	0,015	0,12
Cámara de aire 25 <i>mm</i>	-	0,025	0,17
Cámara de aire 35 <i>mm</i>	-	0,035	0,18
R_{se} piso ventilado	-	-	0,05
R_{se} techumbre	-	-	0,05
R_{si} piso ventilado	-	-	0,17
R_{si} techumbre	-	-	0,09

Estos datos permiten hacer la sumatoria de las resistencias para cuatro casos, pues tanto para pisos ventilados como para techumbres se deben separar las porciones de entrepiso que

tienen lana de vidrio de aquellas donde se observan solo vigas de madera. Así, se suman las resistencias y a partir de cada resistencia total, con la expresión 3.38 se calcula la transmitancia de cada combinación. Además, dadas las escuadrías y espaciamientos entre las vigas y cadenas de la estructura, se calcula que la superficie de cada módulo se distribuye entre 22 % de área de vigas y 78 % de área de lana de vidrio, con lo que se ponderan los resultados de las transmitancias, como se muestra en la tabla 4.14.

Tabla 4.14: Resistencias y transmitancias térmicas del sistema

Pisos ventilados			
Zona vigas		Zona aislante	
Resistencia total (m^2k/W)	2,78	Resistencia total (m^2k/W)	4,87
Transmitancia (W/m^2k)	0,36	Transmitancia	0,21
% área vigas	22	% área aislante	0,78
Transmitancia ponderada (W/m^2k)		0,239	
Techumbre			
Zona vigas		Zona aislante	
Resistencia total (m^2k/W)	2,70	Resistencia total (m^2k/W)	4,79
Transmitancia (W/m^2k)	0,37	Transmitancia	0,21
% área vigas	22	% área aislante	0,78
Transmitancia ponderada (W/m^2k)		0,244	

Considerando que, como se indica en la sección 3.4.4, la zona térmica más exigente en Chile para pisos ventilados por parte de la O.G.U.C. debe tener una transmitancia menor a $0,32 W/m^2k$ y que en techumbres no debe superar los $0,25 W/m^2k$, se puede concluir que el sistema diseñado puede ser utilizado como piso ventilado o como techumbre en cualquier parte de Chile.

4.6. Secuencia de armado

Como parte de la propuesta de industrialización del sistema, se propone una secuencia de armado que considera la disponibilidad o no de maquinaria de control numérico computarizado (CNC). Para ello, se dividen las etapas por estación o mesa de trabajo, considerándose dos trabajadores en cada una.

Además, se supone que vigas, tableros, membrana de caucho y aislante ya están dimensionados de acuerdo a las medidas que corresponda una vez que entran a la línea de producción, por lo que dicha línea consiste únicamente en montaje y fijación de elementos. En cuanto a las herramientas mínimas, se considera necesario para cumplir con cierto nivel de automatización, clavadoras neumáticas y atornilladores eléctricos.

Lo presentado a continuación es una propuesta que no busca detallar cada paso que se tiene que tomar para la fabricación del sistema, sino que ejemplificar cómo se podría abordar dicho proceso. Se pretende también que a través de esta propuesta se visualicen los puntos importantes a considerar en la fabricación y que el proceso sea fácilmente adaptable a las

condiciones de cualquier planta de producción.

- **Mesa 1:** Lo primero que se debe hacer es el montaje del entramado de vigas y cadenetas. Se propone para ello tener elementos que funcionen como molde, para evitar estar constantemente midiendo las posiciones donde se deben ubicar las vigas y cadenetas. Otra alternativa que cumple una función similar sería hacer pequeñas cajas - espigas en los puntos donde se deben ubicar cadenetas y vigas. Esto último se hace muy fácil en caso de tener maquinaria CNC.

Aquí debe considerarse también la importancia de la cuadratura de los paneles, pues cada vez que se vayan agregando vigas y cadenetas, el sistema se estará rigidizando y será más complicado arreglarlo o deformarlo más adelante. Si bien los elementos del tipo moldes mencionados al comienzo de este párrafo ayudarían bastante a la cuadratura, se propone que hayan elementos de madera (o algún otro material más rígido) auxiliares, con las medidas exactas de las diagonales, que se puedan atornillar a las esquinas de los entramados mientras se ubican las vigas interiores y cadenetas que completan el sistema.

Para fijar las piezas de madera entre ellas, se propone algún tipo de grapa o elemento de fijación que permita mantener juntas las vigas hasta que se coloquen las planchas de OSB. En caso de que grapas no sean suficientemente fuertes por imperfecciones de la madera por ejemplo, se pueden utilizar tornillos para mantener la estructura junta.

- **Mesa 2:** Con el entramado listo, se propone que la segunda estación de trabajo coloque el primer tablero de OSB estructural. La colocación debe ir acompañada de una demarcación de la ubicación de las vigas que dejarán de estar a la vista, para poder clavar sobre dichos elementos.

Así, una vez que está fijado el tablero según el patrón de clavado estructural, se pueden colocar los separadores que deben ser atornillados a algún elemento de la estructura (vigas o cadenetas) según la disposición que convenga para facilitar la pasada de instalaciones.

Con esto terminaría el trabajo en fábrica del lado del entrepiso que actúa como cielo, pues como se ha mencionado, la propuesta considera que tableros de yeso-cartón sean colocados en obra para evitar daños que puedan sufrir en el proceso de transporte.

- **Mesa 3:** Al pasar a la siguiente estación el sistema debe ser volteado para seguir trabajando con la estructura a la vista. Esto permite colocar el material aislante en los espacios que quedan entre vigas y cadenetas. Dado que para este tipo de actividad se requieren elementos de seguridad adicionales a los básicos de una fábrica, se propone que esta etapa sea desarrollada de forma exclusiva en una estación y por un solo trabajador, pues con el material previamente cortado, sería una actividad rápida.
- **Mesa 4:** Se propone que en esta estación se coloque y se fije a la estructura el segundo tablero de OSB, de manera análoga a la mesa 2. Luego, posicionar la membrana de caucho (sin elementos de fijación) y finalmente ubicar el tablero de OSB no estructural, que debe ser fijado al resto del sistema mediante la menor cantidad de clavos posibles para evitar puentes acústicos a través del caucho. Se propone que dicha fijación sea mediante un clavo en cada esquina de los módulos, más un clavo por cada borde, que significaría el mismo espaciamiento que se utilizó en la probeta ensayada.

4.7. Estudio de costos

Como parte del informe se incluye un estudio de costos preliminar, con la intención de darle al lector una noción de los costos del producto. Se incluyen costos de mercado de los materiales, costos de producción, transporte y montaje.

En cuanto a los materiales, los valores presentados en la tabla 4.15 son costos totales, es decir, incluyen I.V.A. Como se mencionó, son precios de mercado, por lo que en general se podrían conseguir mejores precios al hacer compras más grandes para una eventual producción en masa. Para el cálculo de dichos valores y su paso a costos unitarios (por m^2) se consideró la construcción de un módulo del sistema, con las unidades de cada material según se encontraron en el mercado, para luego dividir esos costos por la cantidad de metros cuadrados correspondientes al módulo, que son $5,95 m^2$. Finalmente, los valores se expresan en Pesos Chilenos y en U.F.¹

Tabla 4.15: Costos de materiales

Material	Unidad	P.U. (\$)	Cantidad	Total (\$)	Precio \$/m ²
Viga C24 2x8" 4,8 m	UN	17.890	6	107.340	18.029
Viga C24 2x8" 4 m	UN	13.990	1	13.990	2.350
Madera seca cepillada 1x2" 3,2 m	UN	890	5	4.450	747
Tablero OSB APA 15,1 mm 1,22x4,88 m	UN	35.930	3	107.790	18.105
Yeso-cartón RF 15 mm 1,2x2,4 m	UN	8.806	4	35.224	5.916
Lana de vidrio 160 mm 11 kg/m ³	m ²	3.570	5,95	21.254	3.570
Caucho 5 mm 800kg/m ³ 1,25x10 m	ROLLO	93.832	0,5	46.916	7.880
Clavo helicoidal 65x3,1 mm	1/2 kg	1.489	3	4.467	750
Tornillo turbo screw 40x3,5 mm	Pqte.	6.790	1	6.790	1.140
Tornillo para YC punta fina 40x3,5 mm	Pqte.	4.990	1	4.990	838
Total Pesos				353.211	59.327
Total U.F.				12,32	2,07

Para la elaboración de la tabla 4.15, se obtuvieron los valores de las vigas estructurales de la página web de la empresa Easy², a su vez, los valores de la madera aserrada de 1x2" y de los tornillos, son de la página web de la empresa Sodimac³, los precios de los tableros

¹Considerando un valor de U.F. de \$28.662 para el 20 de abril de 2020, según Base de Datos Estadísticos del Banco Central de Chile, consultado en la página web de los indicadores del Banco Central.

²https://www.easy.cl/tienda/categoria/vigas-estructurales?cur_page=1&cur_view=grid&cur_pos=

³<https://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/850594/1x2x320-m-Pino-cepillado-seco/850594>

de yeso-cartón se obtuvieron de la página web de la empresa Chileremates⁴, todas accedidas por última vez el 16 de abril de 2020.

El valor de los clavos helicoidales, viene del valor cotizado en la empresa Prodalam. El precio del rollo de caucho se obtiene de la cotización directa con el fabricante, Polambiente S.A. y el precio de la lana de vidrio se obtuvo también directamente del fabricante Romeral.

No fue posible conseguir el precio del tablero de 15,1 mm de espesor, 1,22 metros de ancho y 4,88 metros de largo, porque de acuerdo a la información entregada por LP Chile, para obtener una cotización sería necesario hacer una evaluación de un proyecto que implicara efectivamente la fabricación del producto. El valor del tablero de OSB es un estimado, a partir del valor de los tableros de las mismas dimensiones, pero de 11,1 mm de espesor. Así, se dividió el precio de los tableros de 1,22 m de ancho, 4,88 m de largo y 11,1 mm de espesor, por 11,1 y se multiplicó por 15,1, manteniendo el precio por metro cúbico de OSB (siguiendo sugerencia del área comercial de LP Chile). Luego, para tener un estimado más conservador, se multiplicó el valor obtenido por un factor de 1,25, aumentando un 25 % el valor del metro cúbico de OSB.

Por otro lado, los costos de producción, transporte y montaje fueron determinados con el apoyo de la empresa E2E. A través de la experiencia que han recabado en la producción y construcción de obras industrializadas, es posible estimar los costos directos del sistema de entrepiso, considerando además de los materiales de la tabla 4.15, instalaciones, herrajes, fabricación, transporte y montaje. Para hacer dicho cálculo, se considera que la obra es un edificio en la zona de Concepción, Chile y que la fabricación de los entrepisos es en Santiago de Chile. Además, una producción de 800 m² de entrepiso en 158 paneles, es decir, con un aprovechamiento del 85 % de las dimensiones totales del módulo (800 m² divididos entre 1,22 por 4,88 por 0,85 dan los 158 paneles). La importancia de este supuesto recae en que tanto los costos de transporte como de montaje se calculan en base a la cantidad de paneles.

Se considera que la producción de entrepisos es en la línea de producción automática, con un alto nivel de industrialización en el proceso (maquinaria CNC para dimensionamiento de vigas y para el clavado de los tableros). Para el transporte, se considera que los paneles van apilados uno encima de otro, con una altura máxima de 2,7 metros. Dado que los paneles al momento del transporte tienen un espesor de 0,254 metros, se pueden hacer pilas de hasta 10 paneles sobre un camión. Considerando camiones con un espacio de carga de 2,5 metros de ancho por 12 metros de largo, entran dos paneles a lo ancho y dos a lo largo, por lo que se pueden transportar hasta 40 paneles de entrepiso por camión.

De esta forma se obtiene que los costos directos del sistema de entrepiso para un caso como el mencionado (y la condición de precios de retail de los materiales) se pueden estimar en 4,32 UF/m².

⁴<https://www.chileremates.cl/productos/materiales-de-construccion/planchas-yeso-carton/plancha-yeso-carton--15mm-rf--12-x-24-mt--rojo/>

Capítulo 5

Probeta y Ensayo

En este capítulo se describe el proceso de armado y ensayo de la probeta, que fue construida en la planta de E2E y ensayado su comportamiento acústico en el laboratorio CPIA. La descripción del proceso busca informar al lector acerca de cómo se llevó a cabo toda la parte práctica y experimental, pero también servir de precedente para ejemplificar buenas y malas prácticas que se hayan llevado a cabo a lo largo del mismo, pensando en la industrialización del sistema diseñado. Además, la explicación aborda las variaciones que tuvo la probeta con respecto al diseño original presentado en el capítulo anterior.

5.1. Construcción de la probeta

La probeta que se construyó para este proyecto fue exclusivamente pensando en el ensayo acústico, por lo que se modificaron las medidas del diseño original para adaptarse al espacio del “portaprobetas” del laboratorio y para facilitar el transporte de los módulos.

La primera restricción importante a considerar es el tamaño del mencionado “portaprobetas”, pues exige que la probeta a ensayar sea exactamente de 2,38 por 4,18 metros, lo que inmediatamente modifica las medidas del prototipo de módulo originalmente diseñado. Para cumplir con dichas medidas se podría haber construido dos módulos de 4,18 metros de largo, uno de los originales 1,22 metros de ancho y otro de 1,16 metros de ancho, sin cambiar mucho el diseño original, pero dicha solución tiene complicaciones desde el punto de vista del transporte. Al ser un solo ensayo con dos módulos, el transporte de módulos de más de 4 metros de largo resultaba excesivamente costoso. Es por eso que se optó por simplificar el transporte y hacer cuatro módulos de 2,38 metros de largo cada uno, tres de 1,22 metros de ancho y un cuarto módulo más angosto de 0,52 metros de ancho. En las figuras 5.1 y 5.2 se muestran planos de los módulos utilizados para los ensayos, donde como se observa, se modifican las medidas de las vigas longitudinales, de los tableros de OSB y de las placas de yeso-cartón, pero se mantiene el patrón de clavado cada 8 centímetros.

Cabe mencionar que antes de decidir hacer las modificaciones mencionadas, se consultó con los especialistas del laboratorio si el comportamiento acústico varía al hacer módulos

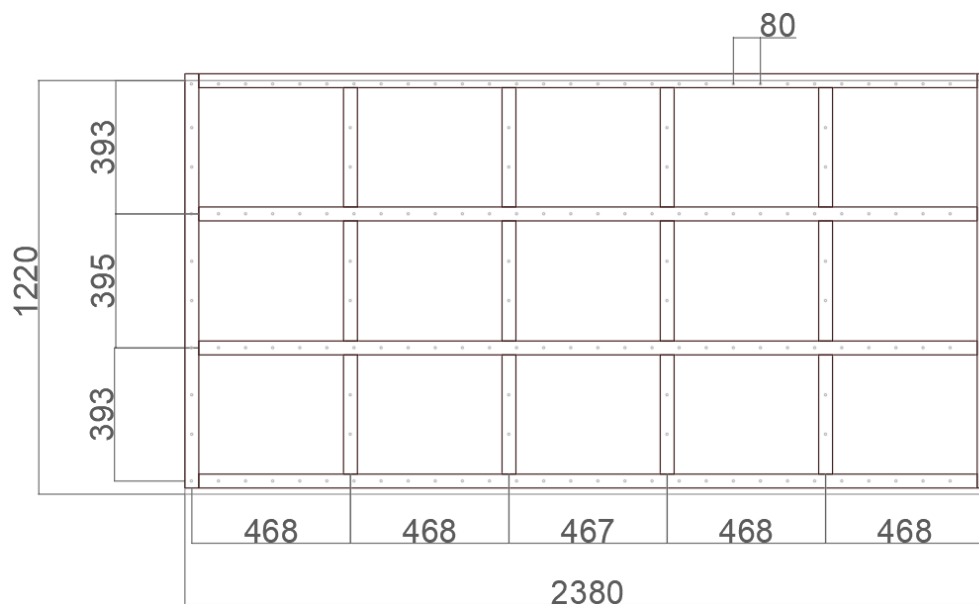


Figura 5.1: Vista en planta de módulo para ensayo, ancho original

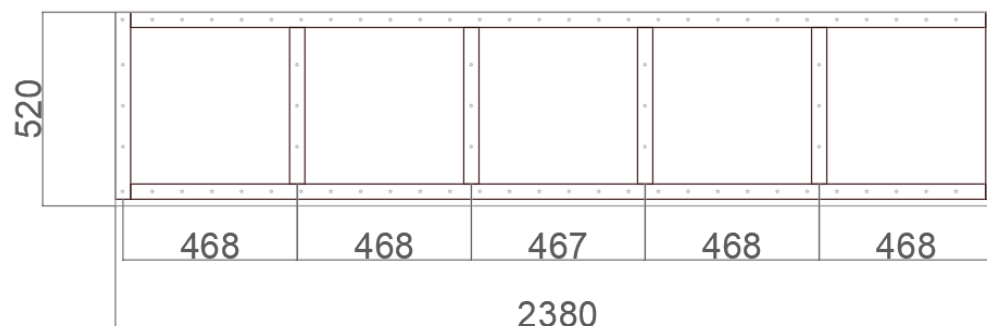


Figura 5.2: Vista en planta módulo para ensayo, ancho adaptado

que cubran una luz de solo 2,38 metros en vez de los 4 metros para los cuales está diseñado, confirmando que ese tipo de modificaciones no influye de manera significativa y que ensayar módulos más cortos es igual de válido.

Si bien la construcción de la probeta se realizó en la planta de E2E, no fue posible contar con la maquinaria de construcción industrializada (control numérico computarizado o CNC) de la planta ni con los trabajadores de la planta, por lo que la construcción se hizo de forma manual, por el mismo memorista, en una de las mesas de trabajo de la línea de producción de la planta, con las herramientas de carpintería allí presentes mencionados a continuación:

- Sierra circular
- Atornillador eléctrico
- Clavadora neumática
- Martillo
- Huincha de medir
- Escuadra

- Tizador
- Cuchillo cartonero

Además, en todo momento se debieron utilizar los elementos de protección personal requeridos para trabajar en la planta de E2E, que son casco, zapatos de seguridad, chaleco reflectante, lentes de seguridad, guantes y tapones para los oídos.

Así, una vez que se tenían los materiales, se comenzó por dimensionar todas las vigas que habían llegado, para construir módulos de las medidas ya mencionadas. Esto fue realizado con huincha de medir y los cortes, con sierra circular.

Para facilitar el armado de la estructura de los módulos, se atornillaron a la mesa de trabajo, trozos de madera en forma de molde, como se muestra en la figura 5.3. En ese mismo proceso, se utilizaron tornillos, que fueron fijados con el atornillador eléctrico para la unión entre las piezas de madera y que se mantuvieran fijas para la colocación del OSB.



Figura 5.3: Estructura de módulo de ensayo

La segunda etapa del armado fue la colocación de la primera plancha de OSB, colocada de tal manera que coincidiera con los bordes de las piezas de madera, pues sería el lado que correspondería al cielo. Al ser esta una de las planchas estructurales del sistema, el patrón de clavado fue el que corresponde al tramo estructural, con un clavado sobre las vigas cada 8 *cm*

quedando como se muestra en la figura 5.4.a. Además, para el clavado se utilizó la clavadora neumática, sobre las marcas que habían sido realizadas previamente con el tizador, visibles en color rojo.

Para terminar con el lado inferior del módulo, se atronillaron a la estructura los separadores sobre los que luego irían atornilladas las planchas de yeso-cartón que conforman el cielo, quedando como se muestra en la figura 5.4.b. Dichos separadores se colocaron de forma perpendicular a las vigas longitudinales, atronillados a las cadenetas. Como se explicará en la etapa del ensayo, las planchas de yeso-cartón no se colocaron en la planta, para que no se dañaran en el transporte al laboratorio, por lo que lo que se observa en la figura 5.4.b es como se enviaron los paneles al laboratorio, a excepción de que se colocaron también separadores en los bordes cortos de todos los módulos.

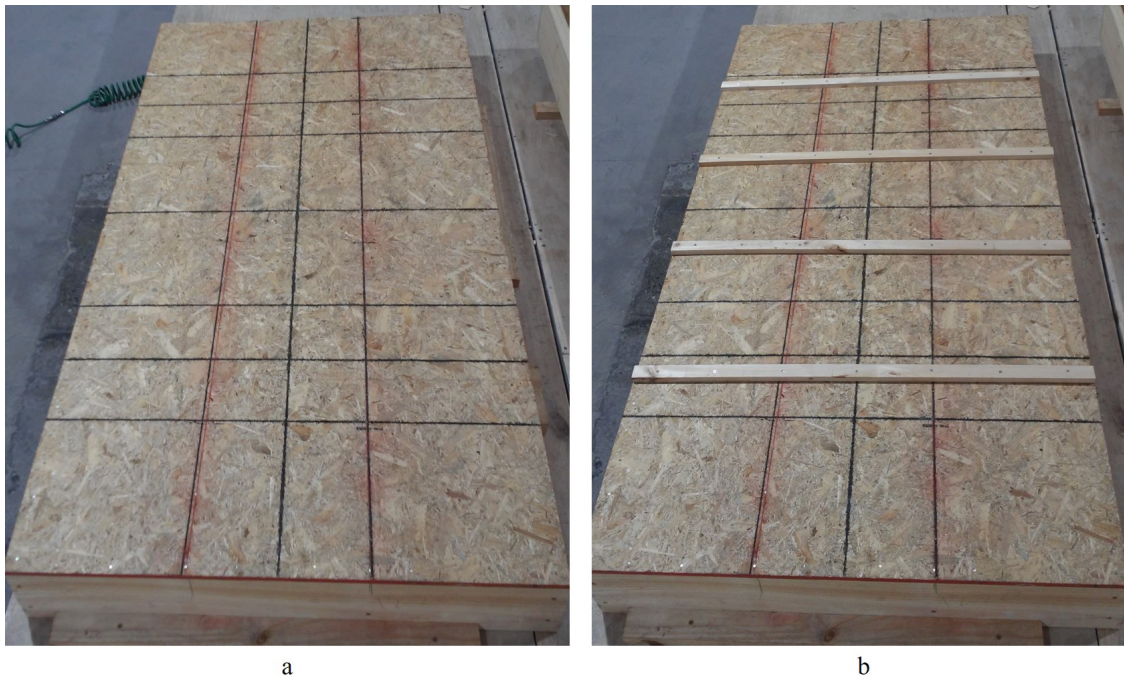


Figura 5.4: Plancha de OSB estructural inferior y separadores

Con el lado inferior del módulo listo, se procedió a voltear el elemento, para quedar con la estructura a la vista nuevamente y así poder colocar el aislamiento como se observa en la figura 5.5, consistente en tres niveles de lana de vidrio de 50 *mm* de espesor y 11 *kg/m*³ de densidad. Se utilizaron tres capas de 50 *mm* por la dificultad de contar con espesores de 150 o 160 *mm* en pequeños volúmenes. La lana de vidrio utilizada estaba en rollos de 60 *cm* de ancho y 10 metros de largo, por lo que el dimensionamiento se hizo directamente estirando el rollo sobre la estructura y cortando con el cuchillo cartonero en las vigas para armar rectángulos de las dimensiones necesarias.

Para la colocación de la lana de vidrio se contó con los elementos de seguridad adicionales requeridos (además de los ya mencionados), que son un overol desechable de papel y una mascarilla de seguridad respiratoria de medio rostro.

La siguiente etapa de confección corresponde a las capas que van por la parte superior de



Figura 5.5: Material aislante

las vigas, es decir, el segundo tablero estructural de OSB, la membrana de caucho y el tablero no estructural de OSB. Al igual que el tablero estructural de OSB que ya se mencionó, el que va por la parte superior de las vigas sigue el patrón de clavado sobre las vigas longitudinales cada 8 *cm*. Nuevamente, se marcaron las vigas con un tizador y se siguieron esas marcas con la clavadora neumática, quedando como se muestra en la figura 5.6.a.

La siguiente capa del sistema corresponde a la membrana de caucho de 5 *mm* de espesor y 800 *kg/m*³. Dicha membrana fue recibida en un rollo de 10 metros de largo y 1,5 metros de ancho, por lo que para dimensionarlo se desplegó el rollo sobre la mesa de trabajo y en las medidas correspondientes (tres de 1,22 por 2,38 metros y uno de 0,52 por 2,38 metros), se cortó con el cuchillo. Esto permitió el estiramiento de la membrana sobre el tablero de OSB estructural, como se muestra en la figura 5.6.b. La colocación de la membrana de caucho no consideró ningún elemento de fijación.

Finalmente, se posicionó el tablero de OSB no estructural, cuya función es ser la “cara visible” del sistema, pues es lo que queda expuesto y sobre lo que va el pavimento que se quiera utilizar. Dado que el tablero no es estructural, no es necesario que vaya clavado siguiendo algún cálculo. Además, la membrana de caucho que está entre medio de los tableros tiene como función desacoplar acústicamente el sistema, por lo que no conviene que tenga muchos elementos de fijación, pues podrían ser puentes acústicos. Así, se optó por fijar este elemento solo en las esquinas, quedando como se muestra en la figura 5.6.c.

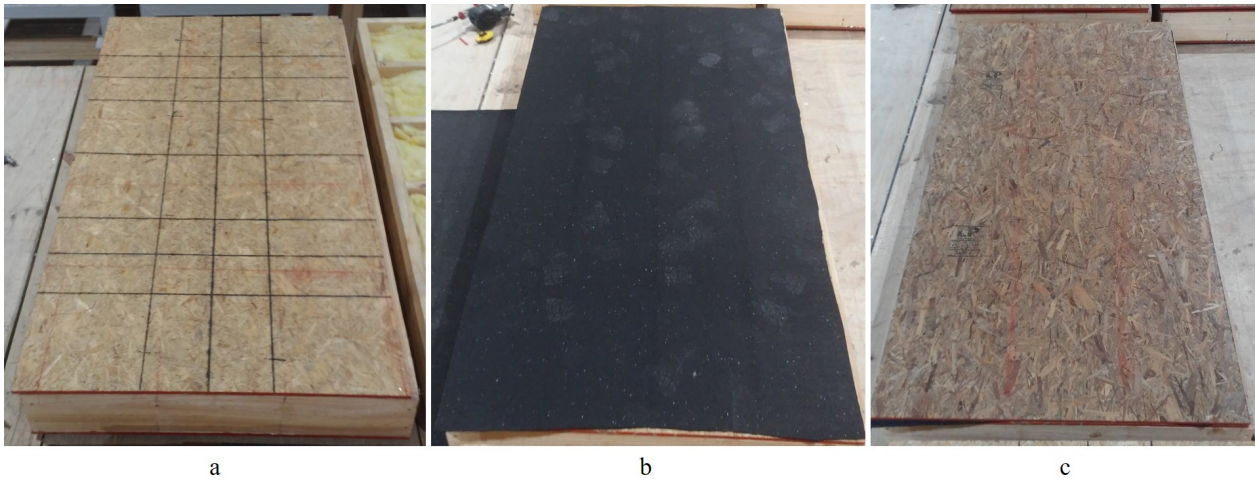


Figura 5.6: Parte superior del módulo

5.2. Manipulación y transporte

Para el transporte de la probeta desde la planta al laboratorio, los módulos ya construidos fueron fácilmente apilados uno encima de otro entre cuatro personas. Como ya se había explicado en la sección 4.3, el sistema tiene un peso propio calculado de 797 N/m^2 , que en unidades de kg son aproximadamente 81 kg/m^2 . Sin embargo, como las placas de yeso-cartón fueron transportadas aparte, los módulos construidos pesan aproximadamente 167 kg cada uno. Así, una grúa horquilla los levantó y trasladó al camión que los llevó al laboratorio. Las placas de yeso-cartón fueron cargadas de la misma manera, montadas una sobre otra, desde la mesa de trabajo con la grúa horquilla, quedando el camión como se muestra en la figura 5.7.a.

El laboratorio cuenta con puente grúa, por lo que la descarga se hizo simplemente con eslingas como se muestra en la figura 5.7.b.

5.3. Ensayo acústico

Como ya se ha mencionado, son dos los ensayos acústicos que se realizaron, uno del nivel de aislación de ruido aéreo y uno de la transmisión de impacto a través del entrepiso. En esta sección se explicará la parte operativa de los ensayos realizados, pues en el informe entregado por el laboratorio e incluido en el apéndice de este documento, se puede encontrar la explicación del detalle técnico de los ensayos, que en ambos casos, siguen la NCh 2786: Acústica - Medición de aislación acústica en construcciones y elementos de construcción - Mediciones en laboratorio de la aislación.[5]

Para ambos ensayos, la disposición de los elementos a ensayar es la misma, por lo que lo primero que se debió hacer fue el montaje de la probeta. Dicha disposición consta de la colocación de la probeta entre la sala receptora, en el subterráneo del laboratorio, y el espacio



a

b

Figura 5.7: Descarga del camión en el laboratorio

donde se emiten los sonidos del ensayo, que es simplemente un espacio abierto del primer piso del laboratorio. El espacio donde se ubicó la probeta está enmarcado por un contorno metálico que ayuda al sellado del elemento ensayado, lo que explica la importancia de la precisión en las medidas de las probetas.

El espacio para la probeta se observa en la figura 5.8 y en la misma figura, se observa también la sala receptora, que es donde se hacen luego las mediciones.



Figura 5.8: Sala receptora y marco para la probeta

En la figura 5.9 se muestra un esquema del laboratorio con los espacios recién descritos, sacado del informe de ensayo presentado en el apéndice del presente documento.

Para la colocación de la probeta, se comenzó por poner las dos capas de yeso-cartón que se

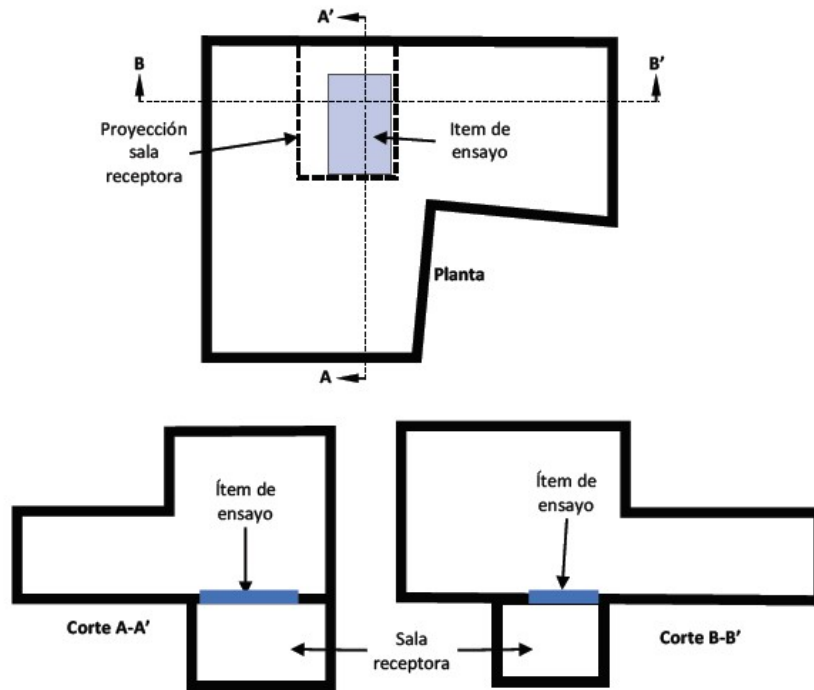


Figura 5.9: Plano del laboratorio, informe de ensayo

posicionaron con el traslape que se considera también en el diseño original. Se colocó también previamente, una viga a lo largo de la mitad del marco para la probeta que sostuviera las placas de yeso cartón mientras se ubicaba el resto de la probeta y se atornillaban las placas a la estructura. Así, con las placas ubicadas en el espacio de la probeta, se comenzaron a colocar los módulos de la probeta con la ayuda del puente grúa y las eslingas, comenzando con el módulo más pequeño, hasta completar los cuatro módulos, como se muestra en la figura 5.10.



Figura 5.10: Etapas de colocación de la probeta

Una vez que estaba ubicada la probeta para el ensayo, se procedió a posicionar al rededor de la misma, un marco metálico que permite sellar el sistema contra fugas acústicas que pudieran haber quedado por errores constructivos o de montaje. Para efectivamente sellar el contorno de la probeta, se utilizó una huincha de espuma fonoabsorbente (figura 5.11.a),

que luego fue reforzada con plasticina (figura 5.11.b) en todas las zonas de contacto entre el marco y la probeta; el marco y el suelo; y en las uniones entre módulos, como se muestra en la figura 5.11.c.

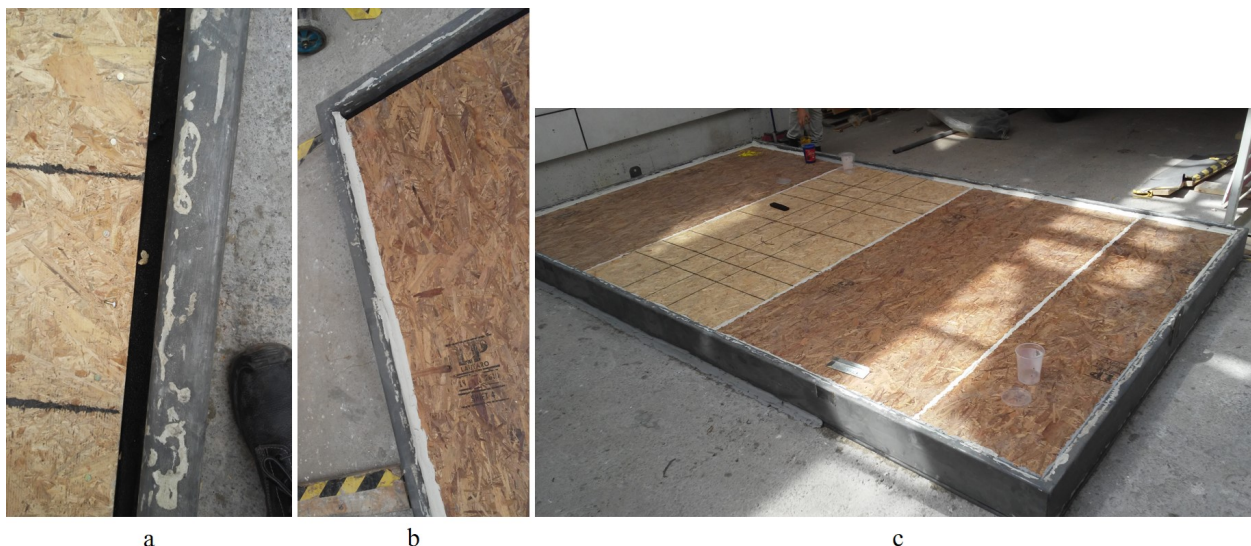


Figura 5.11: Sellos para la probeta

El primero de los ensayos que se realizó fue el de índice de reducción sonora, que consiste en la emisión de sonido desde altavoces ubicados en dos posiciones distintas, que se observan en la figura 5.12.



Figura 5.12: Fuentes de sonido ensayo ruido aéreo

Para la emisión de sonido desde cada una de estas posiciones (no son simultáneas), se realizan mediciones de aproximadamente 10 segundos con un sonómetro, mientras dicho instrumento hace un giro de 360° sobre su eje. Se realizan mediciones tanto en la sala receptora

(figura 5.13.b) como en el espacio abierto donde se emite el sonido (figura 5.13.a), para luego determinar la diferencia entre dichas mediciones y poder calcular el nivel de aislación del sistema.

El ensayo de nivel de presión sonora de impacto a su vez, consiste en la ubicación de la máquina de impactos mostrada en la figura 5.14 en 4 posiciones distintas sobre el entrepiso. Para cada una de las posiciones, la máquina golpea con los martillos que tiene en la parte inferior durante el tiempo que el sonómetro está registrando en la sala receptora (figura 5.13.b), de igual manera que en ensayo de ruido aéreo, mientras hace un giro de 360° sobre su eje.

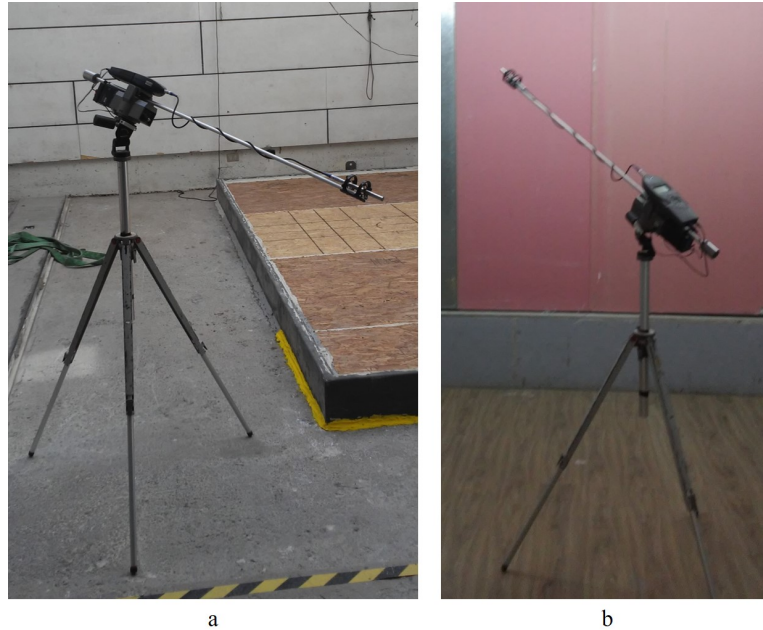


Figura 5.13: Ubicación del sonómetro en ensayos



Figura 5.14: Fuente de impactos en ensayo de impacto

Capítulo 6

Resultados Ensayo

En el apéndice del presente informe se muestra el informe completo emitido por el laboratorio, mientras que a continuación se exponen los resultados más relevantes obtenidos a partir de los ensayos ya descritos, haciendo la comparación con las exigencias acústicas que impone la O.G.U.C para este tipo de elementos, mencionadas en las secciones 2.2.2 y 3.4.1.

Para el ensayo de aislamiento de ruido aéreo, o índice de reducción sonora, el resultado relevante en cuanto a la normativa es el de índice de reducción sonora ponderado R_w , más el término de adaptación de espectro C , que corresponde a 46 dB. Por otro lado, en el ensayo de nivel de presión acústica, para validar el sistema diseñado frente a la normativa nacional, se debe considerar el nivel de presión sonora de impacto normalizado $L_{n,w}$ sumado al término de adaptación de espectro C_l , que en este caso corresponde a 66 dB. Se expone en la tabla 6.1 un resumen de los resultados obtenidos y de las exigencias de la normativa nacional, mostrando que para ambas condiciones, el entepiso diseñado cumple con las exigencias impuestas por la normativa chilena.

Tabla 6.1: Resultados de ensayo y exigencias acústicas

Característica evaluada	Exigencias O.G.U.C.	Resultados ensayo
Índice de reducción acústica mínima	45 dB	46 dB
Nivel de presión acústica de impacto normalizado máximo	75 dB	66 dB

Conclusión

Dado que el objetivo original del presente proyecto es diseñar una solución de entrepisos utilizable en edificios habitacionales de madera, se presentan a continuación las ideas que se pueden concluir a partir de todo lo presentado en el informe, en cuanto a las posibilidades de que el objetivo se cumpla.

Requerimientos normativos y cumplimientos

En primer lugar, los datos más importantes del proyecto son los resultados de los ensayos realizados. Estos permiten concluir que en cuanto a las exigencias acústicas, el diseño propuesto es utilizable en edificios habitacionales en Chile, cumpliendo así con parte de los objetivos. Se destaca el valor de esto, pues tomando en cuenta los requisitos que debe cumplir el sistema, con los resultados del ensayo acústico se da un paso importante hacia la potencial utilización del entrepiso diseñado en edificios habitacionales construidos en Chile.

En cuanto a los requerimientos de resistencia al fuego, es necesario hacer ensayos al respecto para poder eventualmente utilizar la solución propuesta. El nivel de incertidumbre de los métodos analíticos para calcular la resistencia al fuego (además de que dichos métodos no están siendo considerados en el anteproyecto de norma chilena para elementos horizontales) en niveles superiores a F-60, hace que sea poco viable una estimación concreta del valor que se espera para el diseño presentado. Sin embargo, a partir de la comparación con sistemas presentados en el listado oficial de comportamiento al fuego, se estima que el diseño propuesto tenga una resistencia al fuego de F-60 como mínimo, por lo que según lo presentado en este informe, podría ser utilizado en edificios de hasta por lo menos 4 pisos.

Los requerimientos normativos que sí han sido detalladamente calculados son los estructurales y térmicos. Ambos han sido calculados siguiendo la normativa correspondiente (en el caso estructural se consideró la normativa europea además de la chilena para complementar el análisis), por lo que sus resultados positivos, en que todos los requerimientos son satisfechos por el diseño, hacen ver al sistema de entrepiso diseñado como una opción válida.

Industrialización

Tomando otro de los objetivos originales del proyecto, el foco en la industrialización del sistema se puede observar a través de varios puntos del diseño. Se estima que la rapidez y

simplicidad de armado fueron satisfechas, pues las etapas de armado consideran materiales fácilmente manipulables, que no son frágiles ni muy pesados. Las etapas de armado constan en general de procesos muy simples de colocación y fijación de elementos, por lo que se considera que el proceso productivo es altamente industrializable.

Además, como quedó demostrado con la construcción de la probeta ensayada, el sistema es fácilmente adaptable a otras medidas. Si bien los módulos diseñados cumplen con el objetivo de minimizar los desechos (se utilizan los tableros de OSB y las vigas de madera en su totalidad), para un edificio, evidentemente se requerirían variaciones en las dimensiones y la idea es que estas variaciones sean previstas desde las etapas de diseño, para así optimizar la utilización de los materiales. Sin embargo, este sistema también cuenta con la posibilidad de ser adaptado incluso en terreno. Por ejemplo, se podría cortar con una sierra circular la primera capa de OSB, luego con un cuchillo cartonero cortar la membrana de caucho, quedando lo demás (OSB - vigas - OSB) libre para ser cortado por serruchos manuales o herramientas como sierras sables que tienen alcances de hasta 300 *mm*.

Claramente esto último está lejos de los ideales de la construcción industrializada, pero debe ser tomado en cuenta. La industrialización de la construcción es un proceso en el cual se van a tener que enfrentar errores y probablemente en el camino a la plena industrialización vayan a existir muchos proyectos “industrializados a medias” donde arreglos como los ejemplificados serían valorados.

Como se mencionó, el diseño está pensado para optimizar la utilización de materiales en la construcción de módulos de 1,22 por 4,88 metros. Si se analiza el porcentaje de pérdida/utilización de los materiales cubicados (sin considerar los elementos de fijación) para la construcción de un solo módulo, como se muestra en la tabla 4.15, se observa que con las dimensiones mencionadas, se utilizan el 100 % de los tableros de OSB y de yeso-cartón cubicados, lo mismo ocurre con la lana de vidrio. Por su parte, vigas de 2x8” se utilizan en un 98,4 %, los distanciadores de 1x2” en un 91,7 % y la membrana de caucho en un 95,3 %.

Sin embargo, siguiendo la lógica de párrafos anteriores, el sistema no siempre se utilizaría con las dimensiones del diseño presentado en este informe. Así, se utilizaron plantas de 3 departamentos de un mismo edificio (de entre los departamentos analizados para determinar las dimensiones de luces que debe cubrir el sistema), para estimar qué porcentaje de pérdida se tendría si se aplicara directamente el sistema diseñado a las plantas disponibles. Las pérdidas se consideran solo para los tableros de OSB estructurales y para algunas de las vigas estructurales (elementos que no pueden ser completados por vigas o tableros que no tengan la medida completa), pues elementos como la aislación, yeso-cartón y cadenas no se pierden al cambiar las dimensiones de un módulo, se pueden utilizar para completar otros módulos.

De acuerdo a este análisis preliminar, las pérdidas de tableros de OSB estructurales varían entre 16 % y 17,5 % mientras que para las vigas estructurales las pérdidas están en el rango de 13 % a 14,5 %. Hay que destacar que esto se calcula para un caso desfavorable, donde no se consideró el sistema a utilizar en el diseño de la planta (algo que se podría dar en un proyecto real) y donde los módulos se acomodan para un departamento, no para la planta de un piso entero por ejemplo. Es por eso que las pérdidas de material (OSB estructural y vigas estructurales) deberían ser, casi con absoluta certeza, menores a los valores mencionados.

En cuanto a la facilidad de manipulación y transporte, los módulos diseñados cumplen con las condiciones que les permitirían ser movidos por prácticamente cualquier maquinaria. Además de la condición de izaje calculada y propuesta para condiciones de fábrica (con puente grúa) y condiciones de terreno (con grúa o camión pluma), como se mencionó en el informe, el peso de cada módulo es de aproximadamente 485 *kg*, por lo que puede ser levantado y transportado (hasta de varios módulos al mismo tiempo) fácilmente por una grúa horquilla en cualquier circunstancia. Dicha facilidad le da un valor agregado al diseño, pues permite que el mismo sea utilizable en diversas condiciones, tanto de producción en fábrica, como de montaje en terreno. Las dimensiones de los módulos a su vez, permiten que el transporte se optimice, al entrar el ancho de los módulos dos veces en los camiones con espacio de carga de 2,5 metros de ancho.

Costos y competitividad

Es importante considerar también el rango de costos en el que está el diseño y su posicionamiento respecto a otras soluciones. Así, se compara la propuesta de este proyecto en primer lugar con el sistema que utiliza actualmente la empresa E2E en sus proyectos de edificios. Para una comparación en igualdad de condiciones, se consideran, al igual que en la tabla 4.15, valores comerciales para los materiales que utiliza dicho sistema y que tienen un costo estimado de 2,22 UF/ m^2 .

Si bien se observa una leve diferencia de precios favorable al diseño que se presenta en este proyecto (aproximadamente 7% de diferencia entre 2,07 vs 2,22 UF/ m^2), es en la parte de la industrialización donde se pueden observar mayores ventajas. Esto porque el sistema que utiliza actualmente E2E tiene como estructura, vigas I-Joist o doble T de madera, que son más delicadas y complicadas de trabajar que vigas de madera aserrada, por lo que no pasan por la línea de armado automática. Al cambiar la estructura de vigas I-Joist a elementos de madera aserrada estructural, el sistema se podría trabajar directamente en la línea automática, lo que según la experiencia de la planta de E2E, permitiría duplicar la velocidad de fabricación de los entresijos.

Otros sistemas de entresijo que existen actualmente para edificios de madera, son aquellos que propone el Centro de Innovación de la Madera (CIM) de la Universidad Católica, como el que se presenta en la figura A.1. Existen otras variantes del mismo sistema, con variaciones en las dimensiones y tipo de vigas de la estructura, que se pueden observar en la página web del centro. Según un informe elaborado por el CIM el año 2019, en un proyecto de edificio de cinco pisos de viviendas a las que se refieren como emergentes (aproximadamente 100 m^2), los paneles horizontales en su conjunto, tienen un costo directo de 5,42 UF/ m^2 considerando materiales, herrajes, fabricación, transporte y montaje dentro de la zona central de Chile (regiones IV a VII) [16]. Se observa entonces una clara ventaja en términos de costos para el diseño presentado en el presente proyecto. Además, este último no considera la sobrecarga de hormigón que sí tiene el sistema del CIM, lo que es una ventaja desde el punto de vista de la industrialización al evitar faenas húmedas, pero que podría ser una desventaja en términos estructurales.

Puntos pendientes y propuestos para la validación total del sistema

Si bien todos los puntos presentados juegan a favor de la implementación del sistema diseñado, para lograr que eso ocurra se deben tener en cuenta las falencias y los puntos pendientes. Lo más evidente que le falta al sistema para poder ser utilizado, es la acreditación del nivel de resistencia al fuego, sin embargo, no se pueden obviar otros elementos, más ligados con la parte estructural.

El cálculo estructural que se realizó en el presente proyecto fue concentrado en las condiciones que debe cumplir el elemento de forma individual, no consideró la interacción del sistema con los muros, el comportamiento lateral o la interacción entre los módulos del mismo, que serían esenciales para el proyecto de cálculo estructural de un edificio. En este momento, dichos análisis y soluciones quedan propuestos para la ingeniería de cada proyecto.

Si bien se esbozó un acercamiento a la clasificación de la rigidez/flexibilidad del sistema en su rol de diafragma, este debe ser analizado para cada caso, pues tiene mucho que ver con cómo funciona el resto de la estructura, especialmente los muros de corte. Es por ello que hacer un análisis profundo de dicho comportamiento puede resultar clave para la consolidación del sistema.

Además, como se explicó en el informe, el cálculo estructural consideró varios supuestos en cuanto a las tensiones admisibles, siempre por el lado conservador, especialmente en base a las propiedades de los tableros estructurales. Por otro lado, la metodología de la NCh 1198 seguida en este caso considera una gran cantidad de coeficientes y parámetros que también contribuyen a estar por el lado de la seguridad en el diseño. Así, en lo que respecta a los entresijos, se recomienda la realización de ensayos mecánicos del sistema para calibrar los métodos utilizados y comprobar la precisión y exactitud, tanto de cálculos como de propiedades mecánicas de los componentes del sistema.

Bibliografía

- [1] American Wood Council. *Special Design Provisions for Wind and Seismic 2015 Edition*. 2014.
- [2] Ramón Argüelles and Francisco Arriaga. El Uso de la Madera en la Construcción. In *I Congreso Forestal Español*, volume 4, pages 239–248, Lourizán, 1993.
- [3] Ramón Argüelles Álvarez, Francisco Arriaga Martitegui, Miguel Esteban Herrero, Guillermo Íñiguez González, and Ramón Argüelles Bustillo. *Estructuras de madera. Bases de cálculo*. Asociación de investigación técnica de las industrias de la madera, 2013.
- [4] Canadian Wood Council. Embodied Energy of WOOD Products. *Quick facts - Sustainable building series*, 2004.
- [5] División de Normas del Instituto Nacional de Normalización. NCh2786 Acústica - Medición de aislación acústica en construcciones y elementos de construcción - Mediciones en laboratorio de la aislacion acústica aérea entre recintos, 2003.
- [6] División de Normas del Instituto Nacional de Normalización. NCh 853 Acondicionamiento térmico - Envolvente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas, 2007.
- [7] European Committee for standarization. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, 2004.
- [8] Justo García Navarro and Eduardo De la Peña Pareja. Breve Historia de la Madera en la Construcción (III). *Boletín de Información Técnica AITIM N° 215*, pages 72–79, 2002.
- [9] Michael C. Green. *The Case for Tall Wood Buildings*. Blurb, 2012.
- [10] Hans Grosse. *Perspectivas de la construccion en madera en Chile*, 2013.
- [11] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Cuadro normativo y tabla de espacios y usos mínimos para el mobiliario para proyectos del Fondo Solidario de Elección de Vivienda regulado por el D.S. N° 49, 2017.
- [12] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, 2018.

- [13] NIST. Seismic Design of Wood Light-Frame Structural Diaphragm Systems: A Guide for Practicing Engineers - NIST GCR 14-917-32. Technical Report 10, Applied Technology Council for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD., 2014.
- [14] Observatorio Urbano MINVU. Déficit habitacional por comuna CENSO 2017. Technical report, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2018.
- [15] Diego Tomás Ortiz Acevedo. *Análisis Normativo y Estudio Estadístico de Ensayos de Resistencia al Fuego de Elementos Divisorios Horizontales y Verticales en Base a Madera Realizados en Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil*. Pregrado, Universidad de Chile, 2018.
- [16] Danny Pavez Gallegos. Análisis de Costos de viviendas para edificación en madera en dos tipologías de 5 pisos en la Zona Central. Technical report, Centro UC de Innovación en Madera, Santiago de Chile, 2019.
- [17] Vittorio Salvadori. *The Development of a Tall Wood Building. Tesis para optar al grado de Magíster en Arquitectura*. Masters, Politecnico Milano & TU Wein, 2017.
- [18] Alejandra Tapia Soto. Iniciativa Industrialización y Prefabricación Profundización de Iniciativas de la Hoja de Ruta Para su Implementación. Technical report, Construye 2025, 2016.
- [19] Stefan Winter, Markus Lechner, and Claudia Köhler. Industrialization of Building Processes - a chance for timber to take the lead. In *2018 World Conference on Timber Engineering*, Seoul, Republic of Korea, 2018.
- [20] Binsheng Zhang, Birgit Rasmussen, André Jorissen, and Annette Harte. Comfort Assessment for Sound and Vibration. Technical report, European Cooperation in Science and Technology, 2013.

Apéndice A

Sistema utilizado en Torre Peñuelas

 **Centro UC**
de Innovación
en Madera

**SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS
PARA EDIFICACIÓN EN MADERA**

ENTREPISO

DESCRIPCIÓN

Sistema de estructura de madera, en base a envigado 4x185mm @ 40 cm, distanciadores de 20x41mm @ 40 cm de pino CMPC, con una sobrelosa de hormigón de 41mm, placa arriostrante terciada de 15mm, membrana acústica de 5mm y dos placas de yeso cartón Romeral Gyplac resistente al fuego interior de 15mm. En cavidades interiores, y entre envigado, se considera colchoneta de lana de vidrio Romeral R100 de 282 de densidad nominal 11 Kg/m³ y espesor nominal 120mm.

DETALLE



DESEMPEÑO

ACÚSTICO	FUEGO
Aéreo 47dB(A)	F60
Impacto 64dB	

ANTECEDENTES



Para descarga de antecedentes de ensayos, estudios y memorias acceder a enlaces adjuntos. Los antecedentes entregados, consideran material necesario para dar cumplimiento a requerimiento normativo, ante dirección de obra municipal pertinente.

El uso de los antecedentes entregados, es de exclusiva responsabilidad de quien los utilice.

Derechos reservados Pontificia Universidad Católica de Chile inscripción N°281.738 *

<http://construccionmadera.cl>



Figura A.1: Sistema utilizado en la Torre Experimental Peñuelas

Apéndice B

Detalle de departamentos analizados

Tabla B.1: Detalle de los departamentos analizados para determinar luces de diseño

Comienzo de la tabla			
INMOBILIARIA	EDIFICIO	SUPERFICIE [m ²]	VANO MÁX. [m]
Almagro	Santa Elena 922	30,41	3,75
	Santiago	35,74	3,21
		62,47	3,12
	Seminario 763	34,84	2,67
	Ñuñoa	59,15	2,53
	Carrera III	29,3	3,83
	Santiago	104,63	3,43
		60,64	3,67
	General Mackenna II	34,48	3,62
	Santiago	26,02	3,7
		52,53	3,57
	El Llano	129,95	3,78
	San Miguel	77,75	2,95
	Los Estanques	83,32	4,61
Providencia	124,2	3,77	
Colon 4947	150,86	4,13	
Las Condes	89,97	4,95	
Echeverría Izquierdo	Flow	35,13	5,37
	Santiago	50,41 (duplex)	4,3
		71,47 (duplex)	4,8
	Humana	36,21	3,6
	La Cisterna	55,33	3,62
		65,09	4,35
		45,1	3,8
	Vanguardia	48,59	3,27
	Macul	75,22	3,23
		70,04	4,56
	78,65	4,4	

Continuación de tabla B.1			
INMOBILIARIA	EDIFICIO	SUPERFICIE [m2]	VANO MÁX. [m]
Socovesa	Walker	37,93	2,85
	La Florida	52,45	4,68
		59,74	2,95
		88,99	5,2
		65,31	3
	Plaza La Florida La Florida	81,89	4,25
		92,14	3,95
		107,63	4,65
		M3	59,83
	Macul	69,07	2,98
		84,39	4,7
		100,33	3,55
Absalon		Karü La Florida	71,49
	71,23		4,94
	88,43		4,72
	Aliwen La Florida	63,42	3,54
		65,33	3,55
		80,06	4,52
		77,18	3,95
	Altaír Con-Con	58,1	4,8
		61,38	4,8
		61,45	3,64
		93,98	3,75
	Arauco	García Valenzuela Ñuñoa	27,42
40,4			2,75
61,9			5,1
Bustos Providencia		98,3	3,75
		100,7	4,7
		101,8	3,15
		115,2	3,3
Fin de la tabla			

Apéndice C

Zonificación térmica de Chile

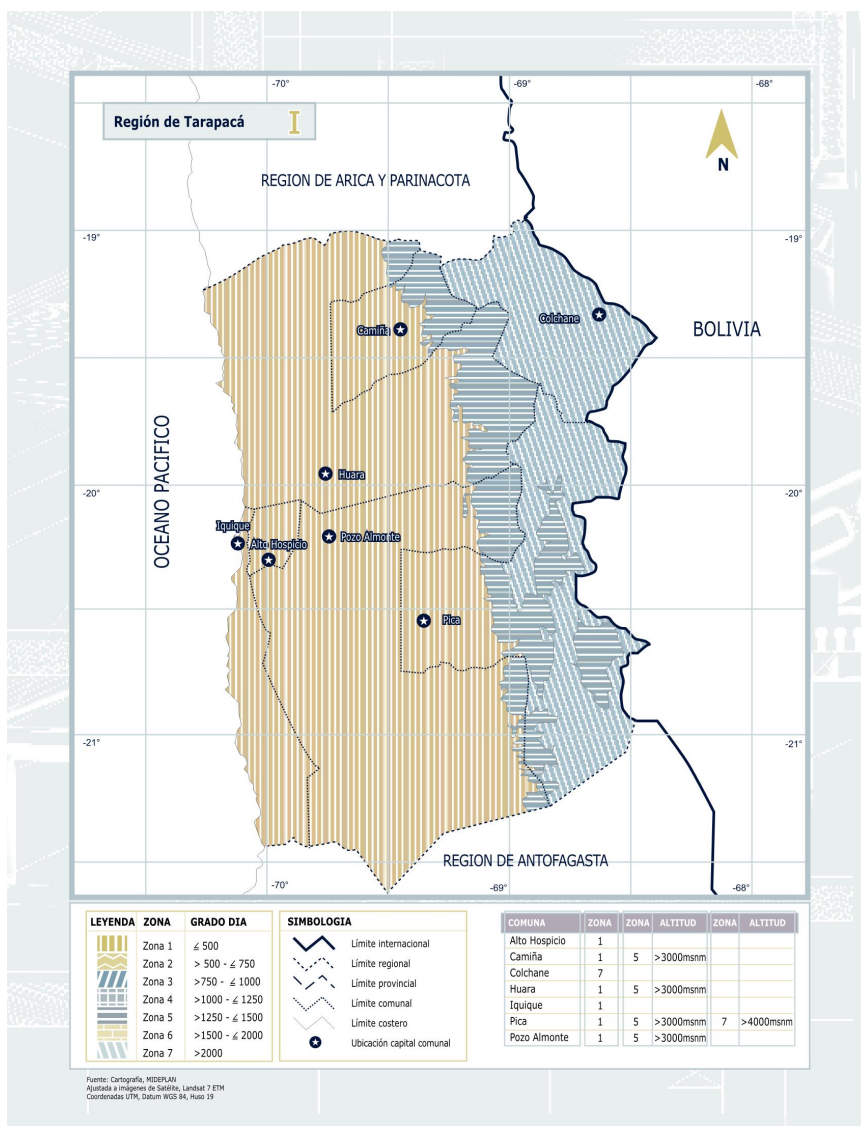
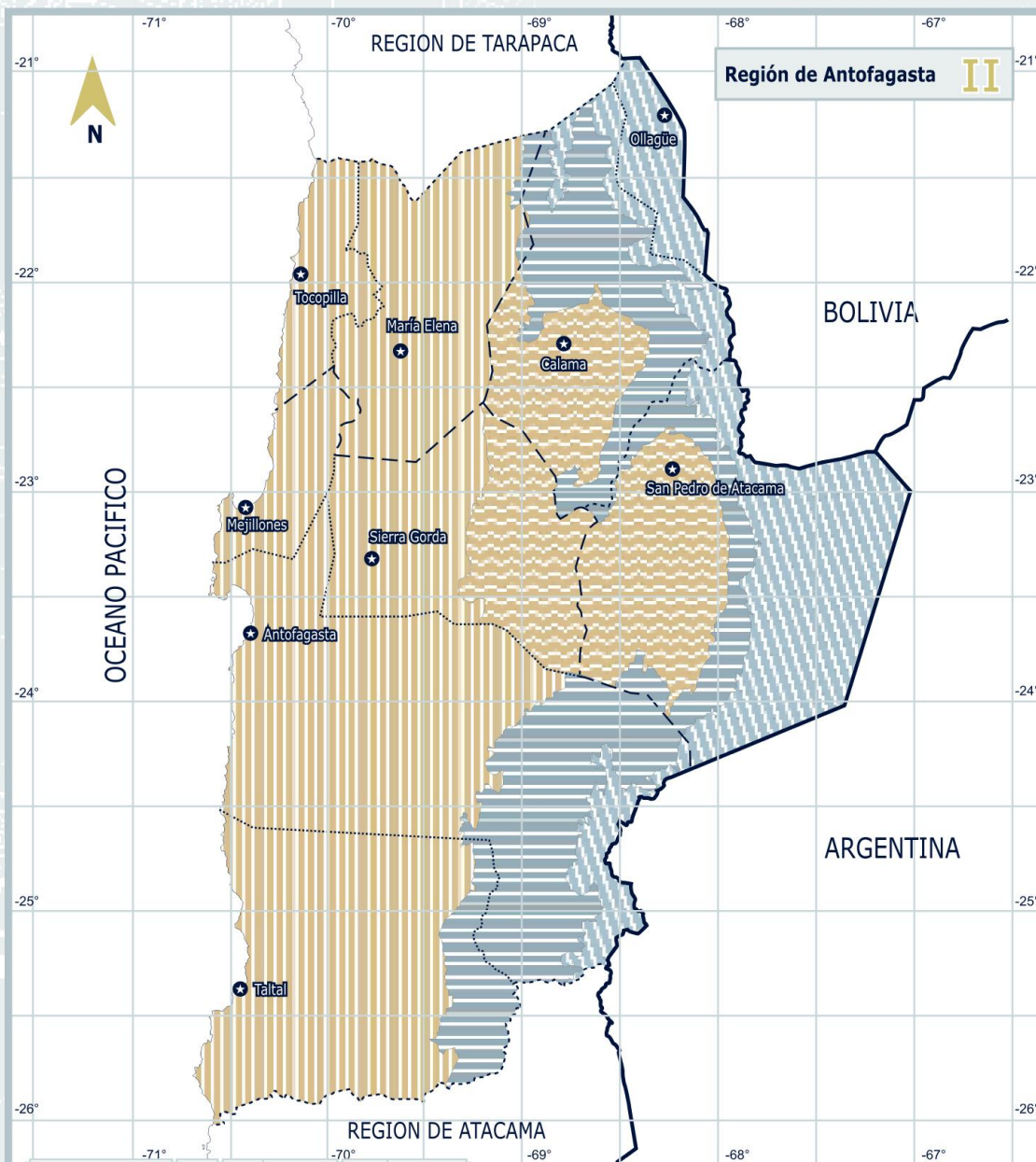


Figura C.1: Zonificación térmica Región de Tarapacá, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU



COMUNA	ZONA	ZONA	ALTITUD	ZONA	ALTITUD
Antofagasta	1	5	>3000msnm	7	>4000msnm
Calama	2	5	>3000msnm	7	>4000msnm
María Elena	1	5	>3000msnm		
Mejillones	1				
Ollagüe	7				
San Pedro de Atacama	2	5	>3000msnm	7	>4000msnm
Sierra Gorda	1	2	>2000msnm		
Taltal	1	5	>3000msnm		
Tocopilla	1				

SIMBOLOGIA	
	Límite internacional
	Límite regional
	Límite provincial
	Límite comunal
	Límite costero
	Ubicación capital comunal

LEYENDA ZONA GRADO DIA		
	Zona 1	≤ 500
	Zona 2	> 500 - ≤ 750
	Zona 3	> 750 - ≤ 1000
	Zona 4	> 1000 - ≤ 1250
	Zona 5	> 1250 - ≤ 1500
	Zona 6	> 1500 - ≤ 2000
	Zona 7	> 2000

Fuente: Cartografía, MIDEPLAN
Ajustada a imágenes de Satélite, Landsat 7 ETM
Coordenadas UTM, Datum WGS 84, Huso 19

Figura C.2: Zonificación térmica Región de Antofagasta, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

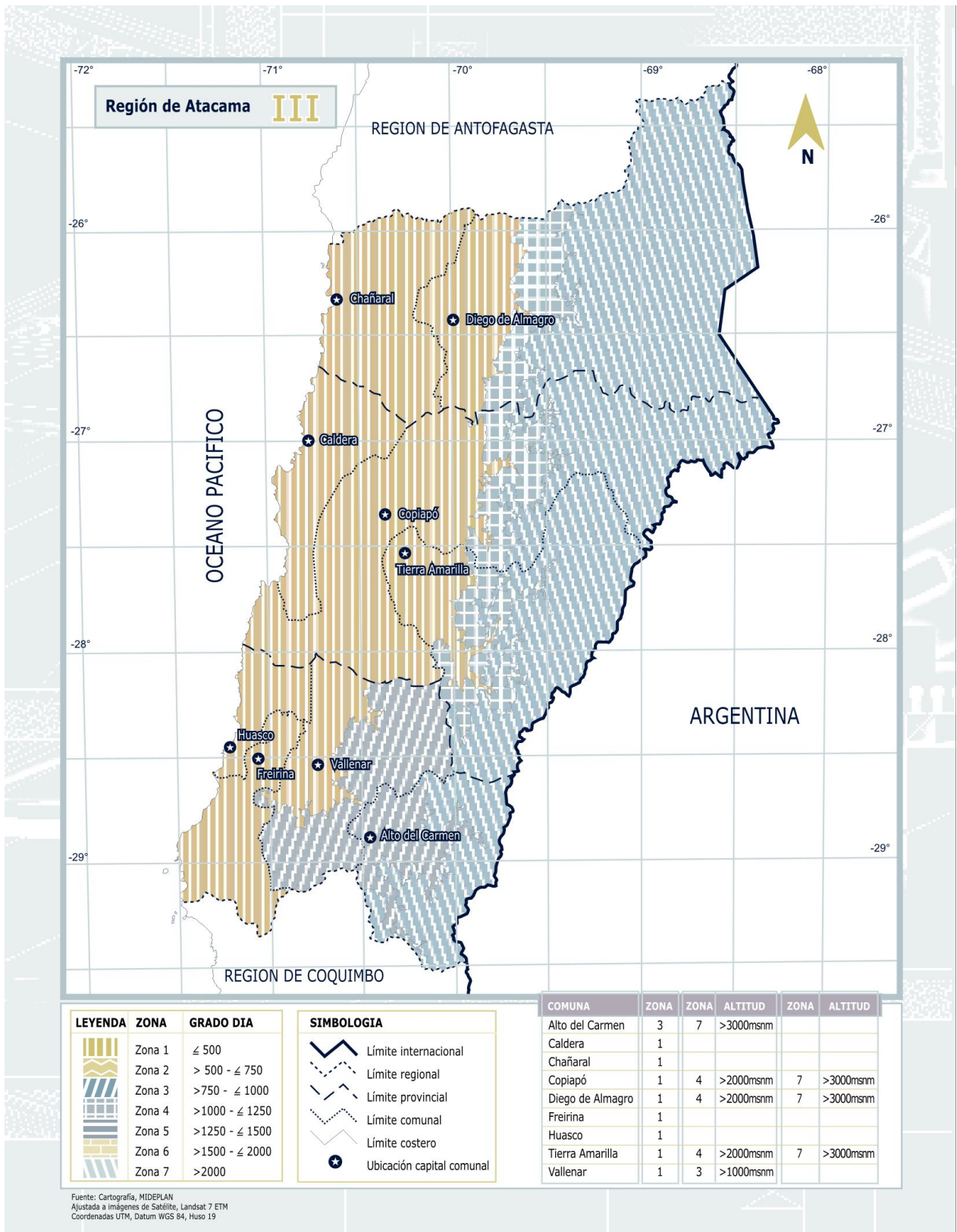


Figura C.3: Zonificación térmica Región de Atacama, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

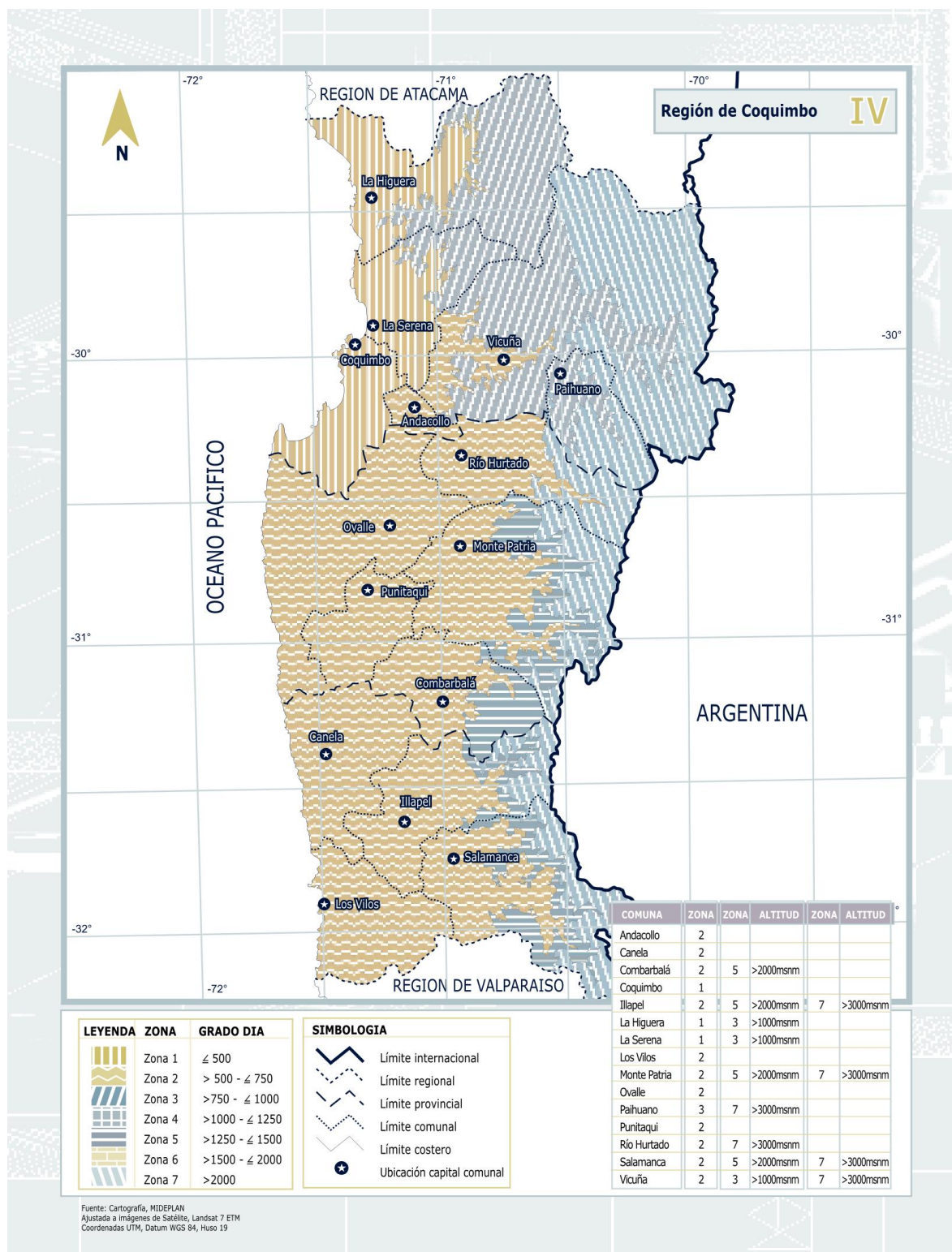


Figura C.4: Zonificación térmica Región de Coquimbo, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

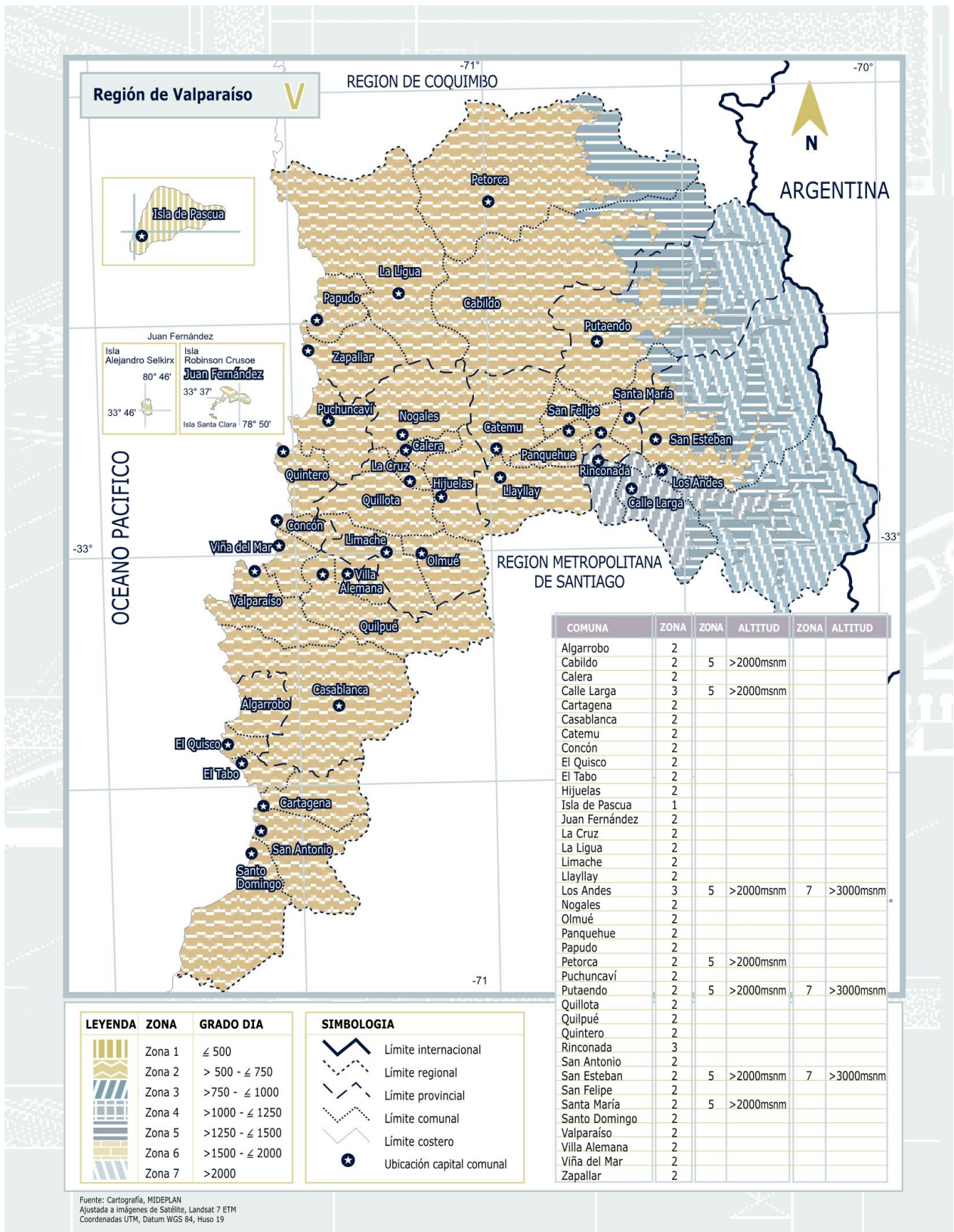


Figura C.5: Zonificación térmica Región de Valparaíso, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

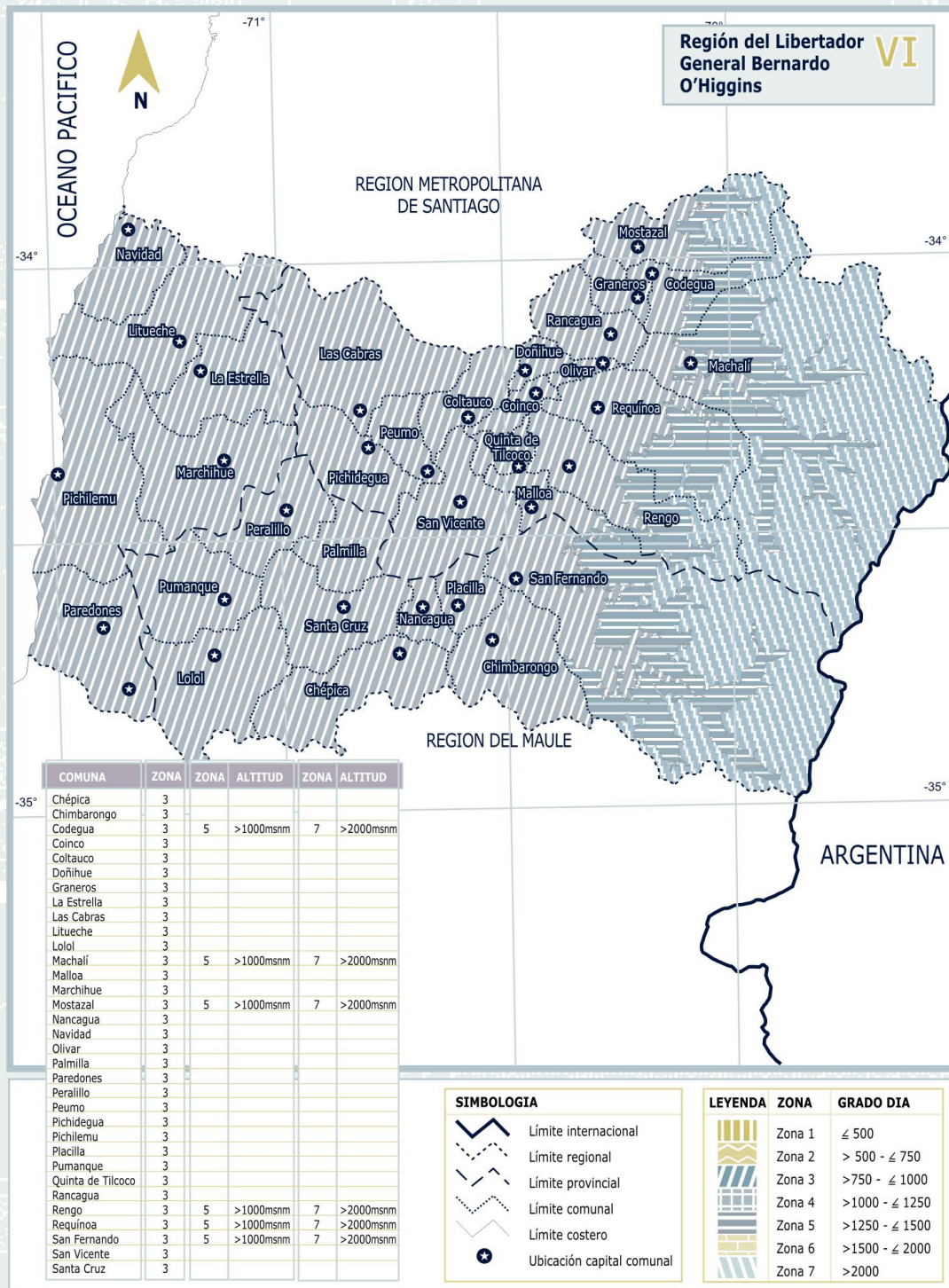


Figura C.6: Zonificación térmica Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

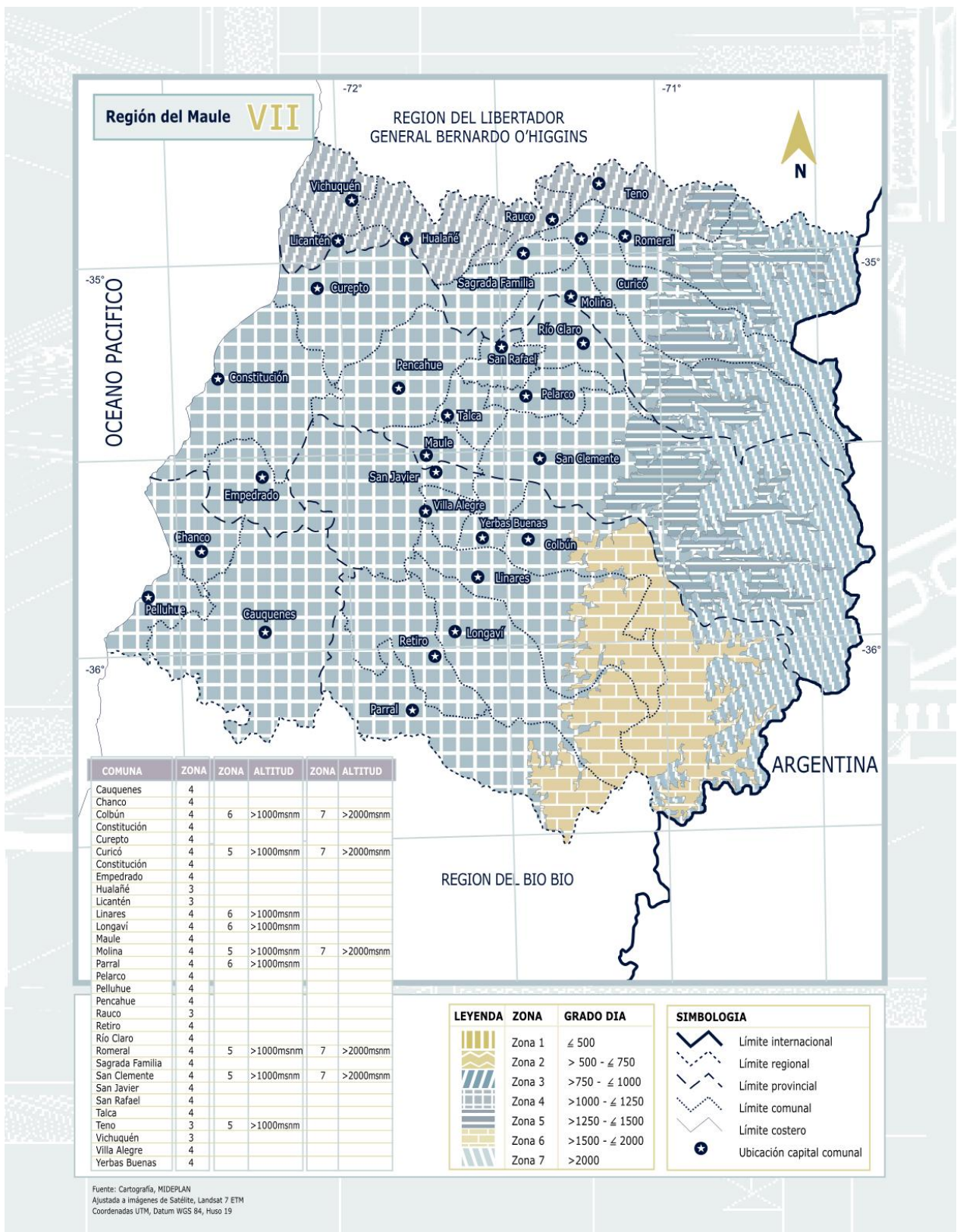


Figura C.7: Zonificación térmica Región del Maule, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

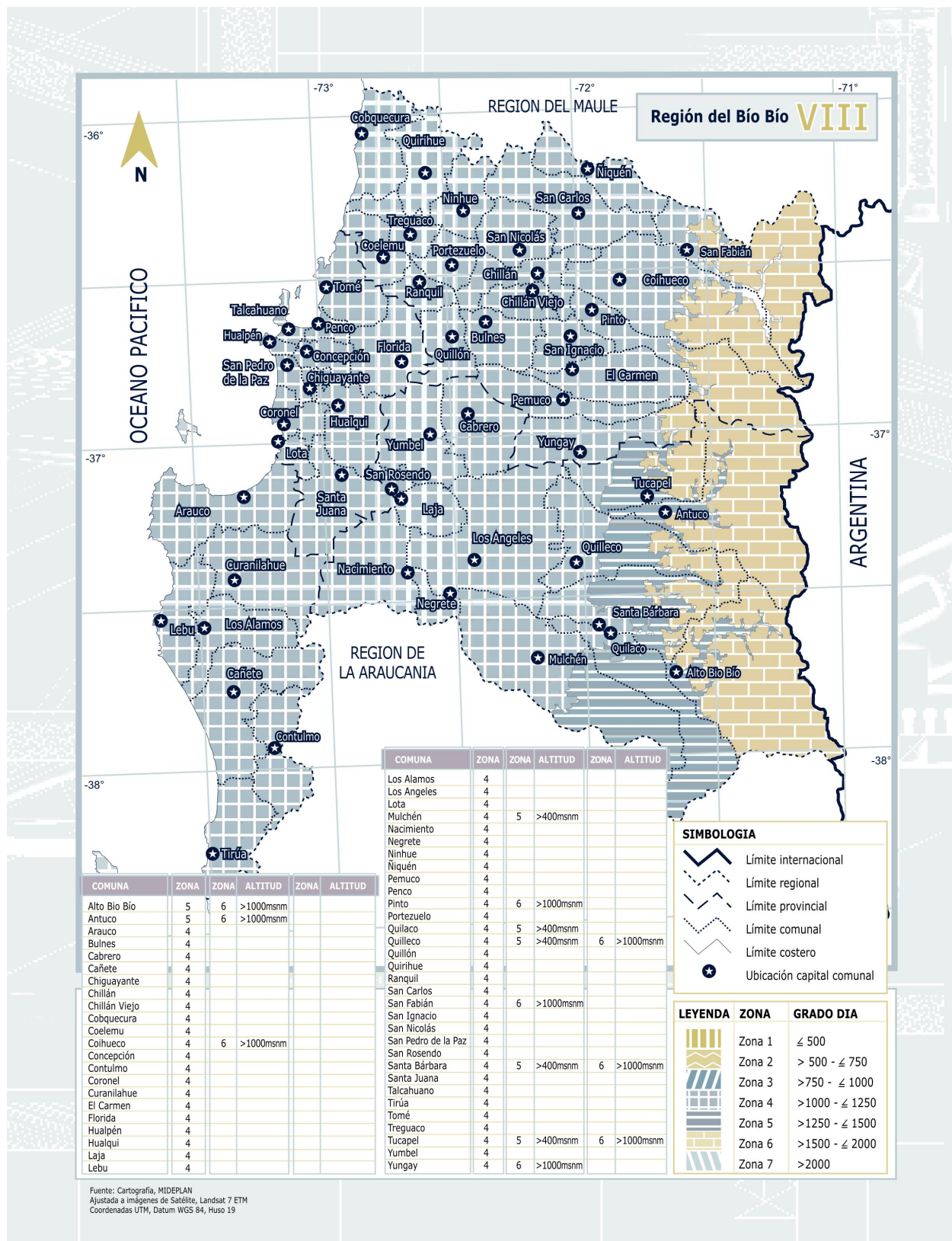


Figura C.8: Zonificación térmica Región del Bío-Bío, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

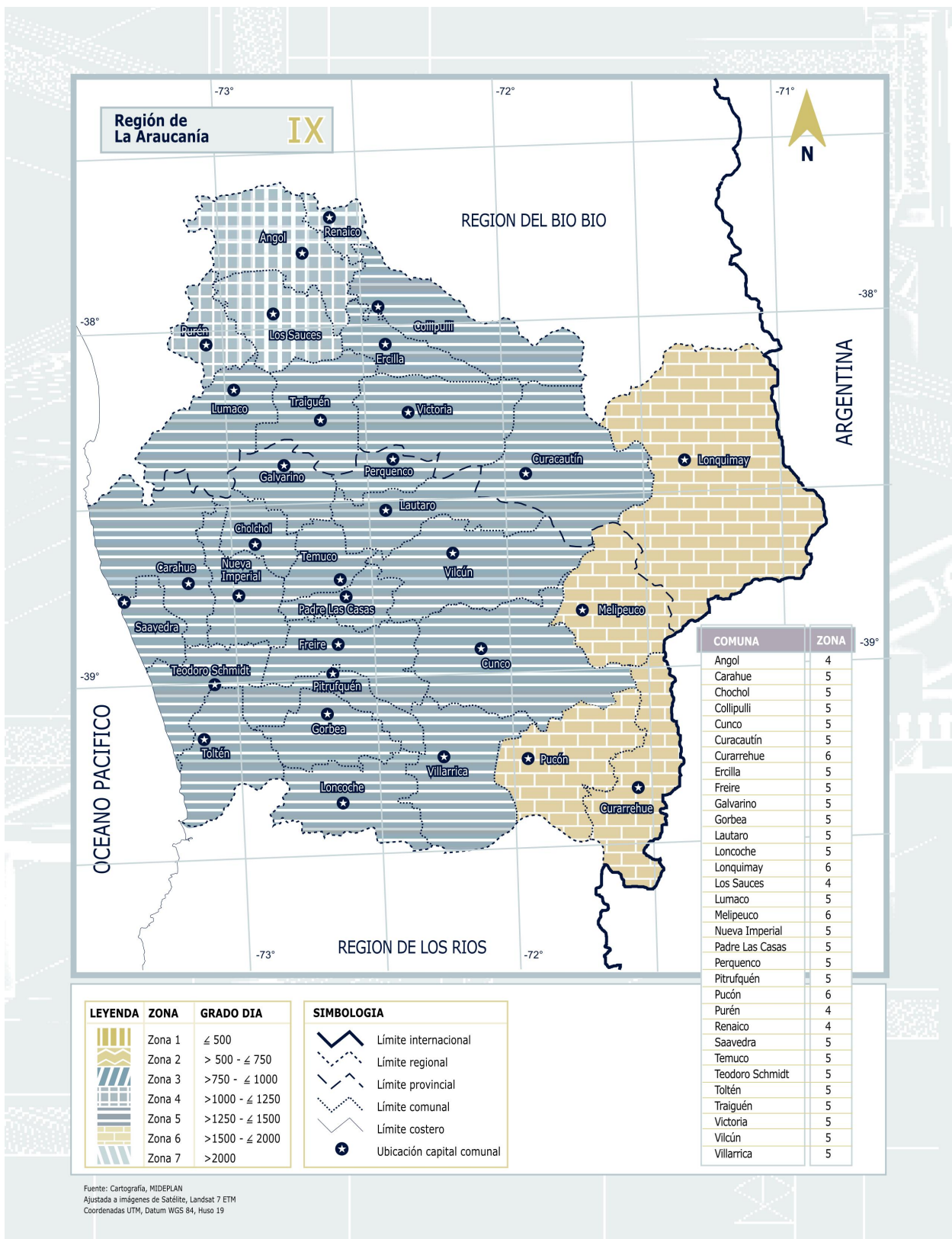


Figura C.9: Zonificación térmica Región de La Araucanía, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

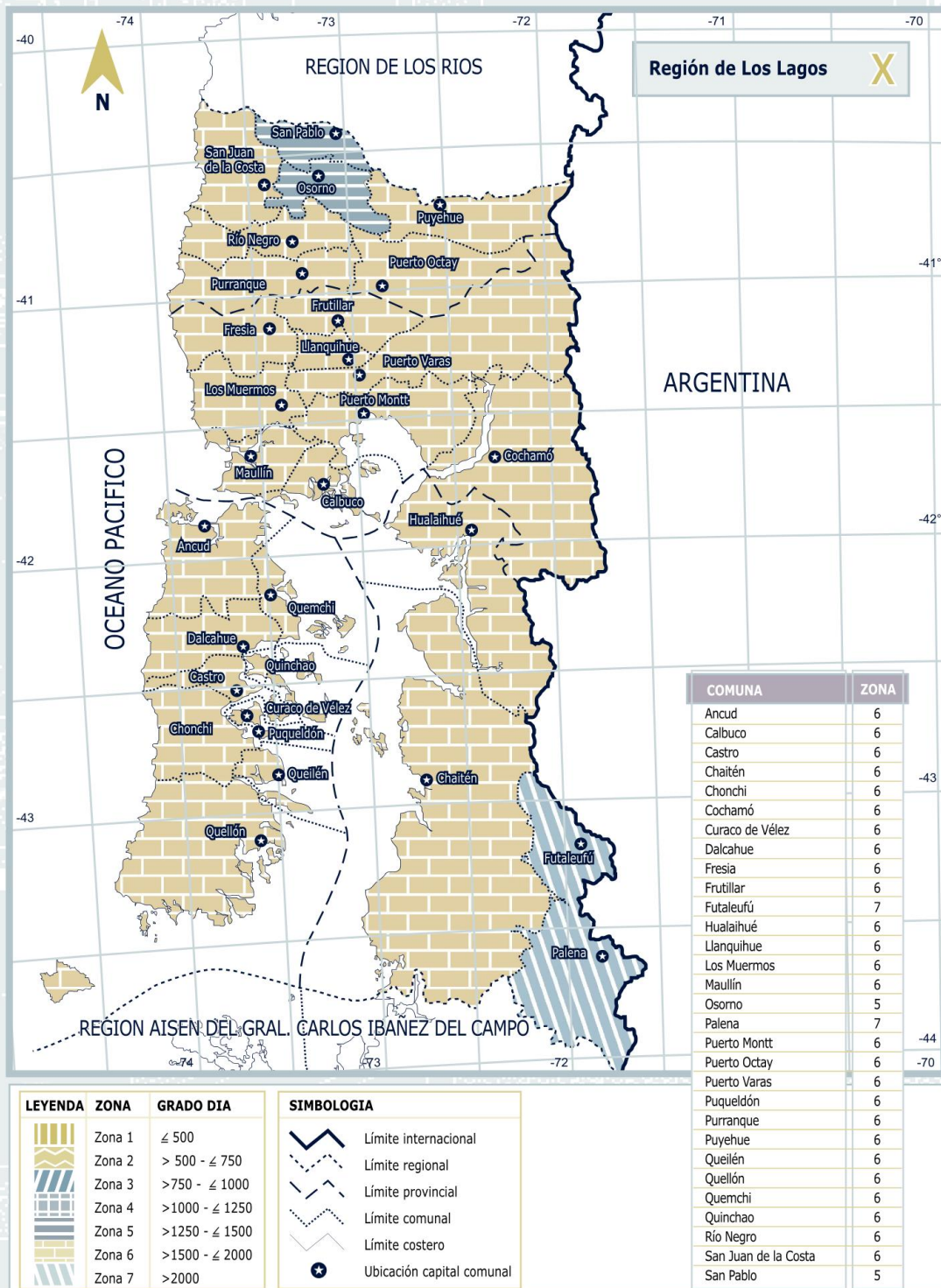


Figura C.10: Zonificación térmica Región de Los Lagos, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

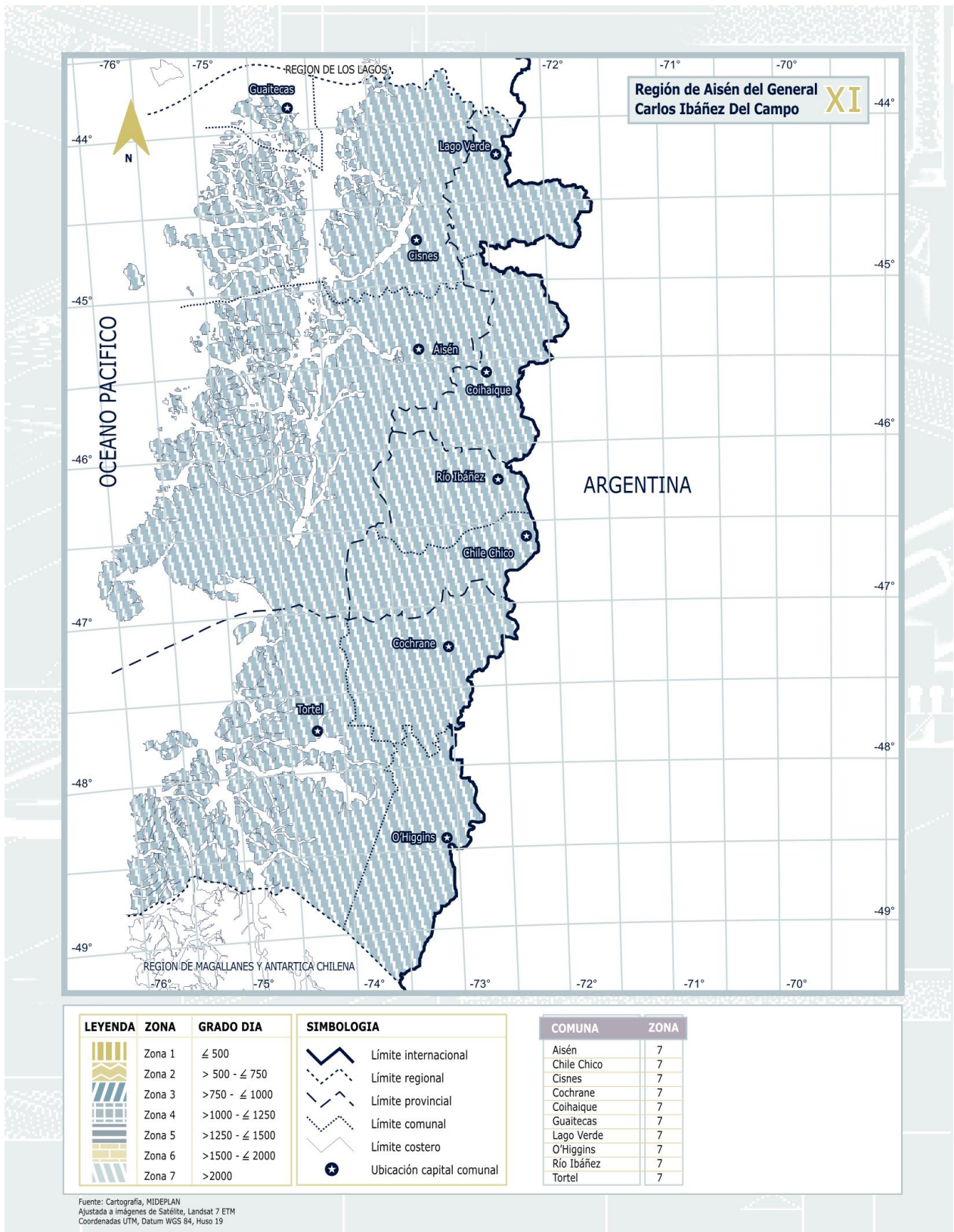


Figura C.11: Zonificación térmica Región de Aisén del General Carlos Ibáñez del Campo, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

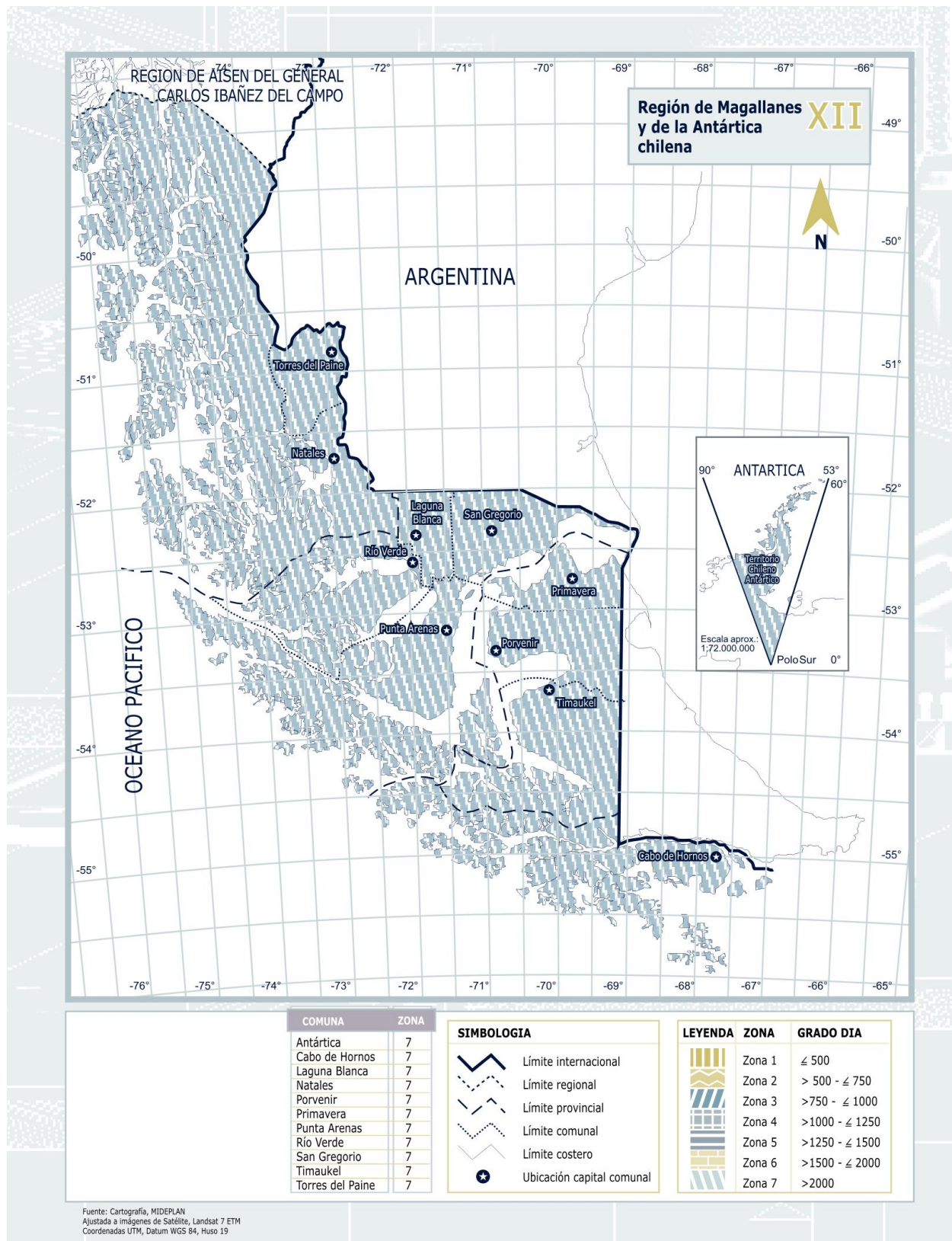


Figura C.12: Zonificación térmica Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

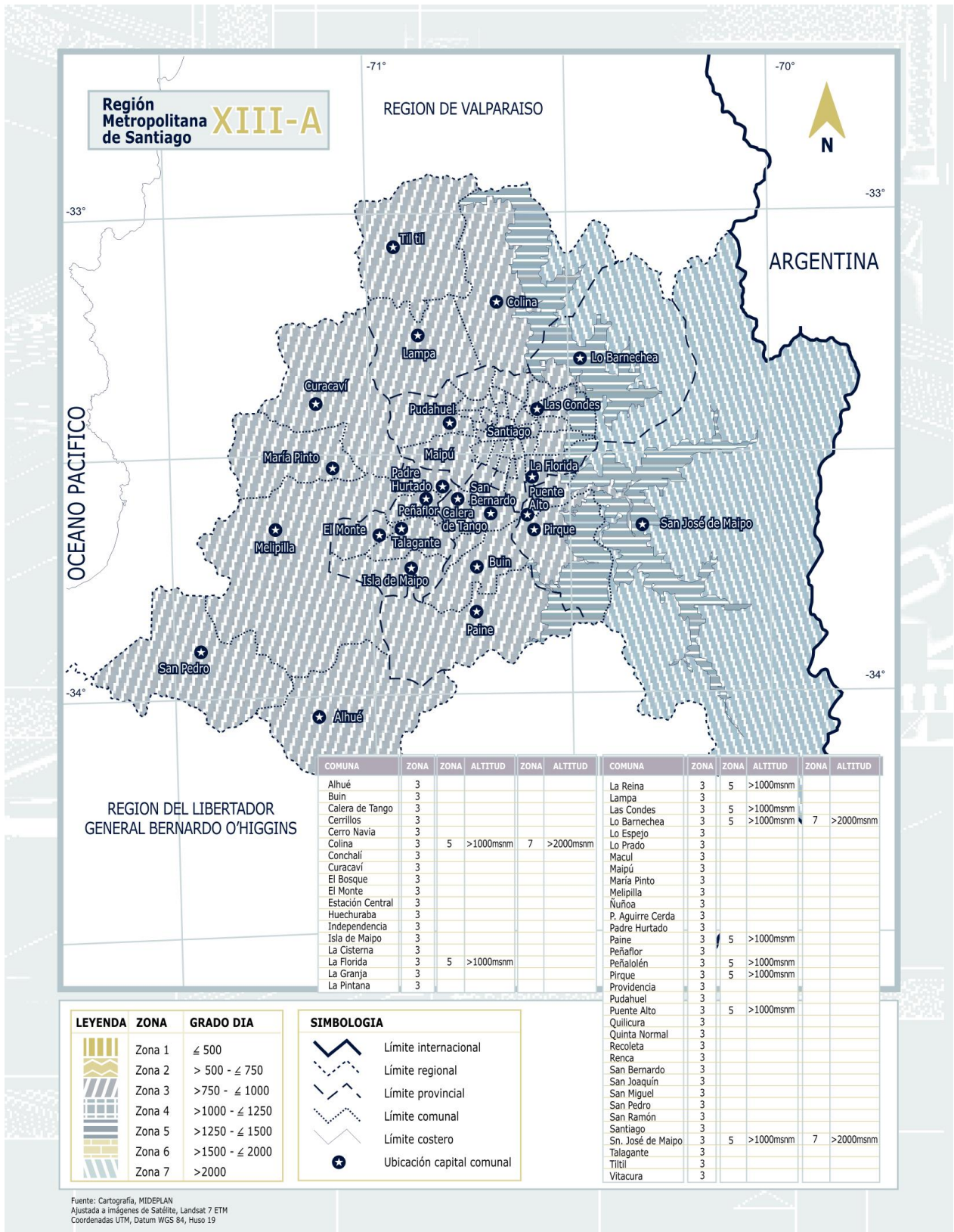
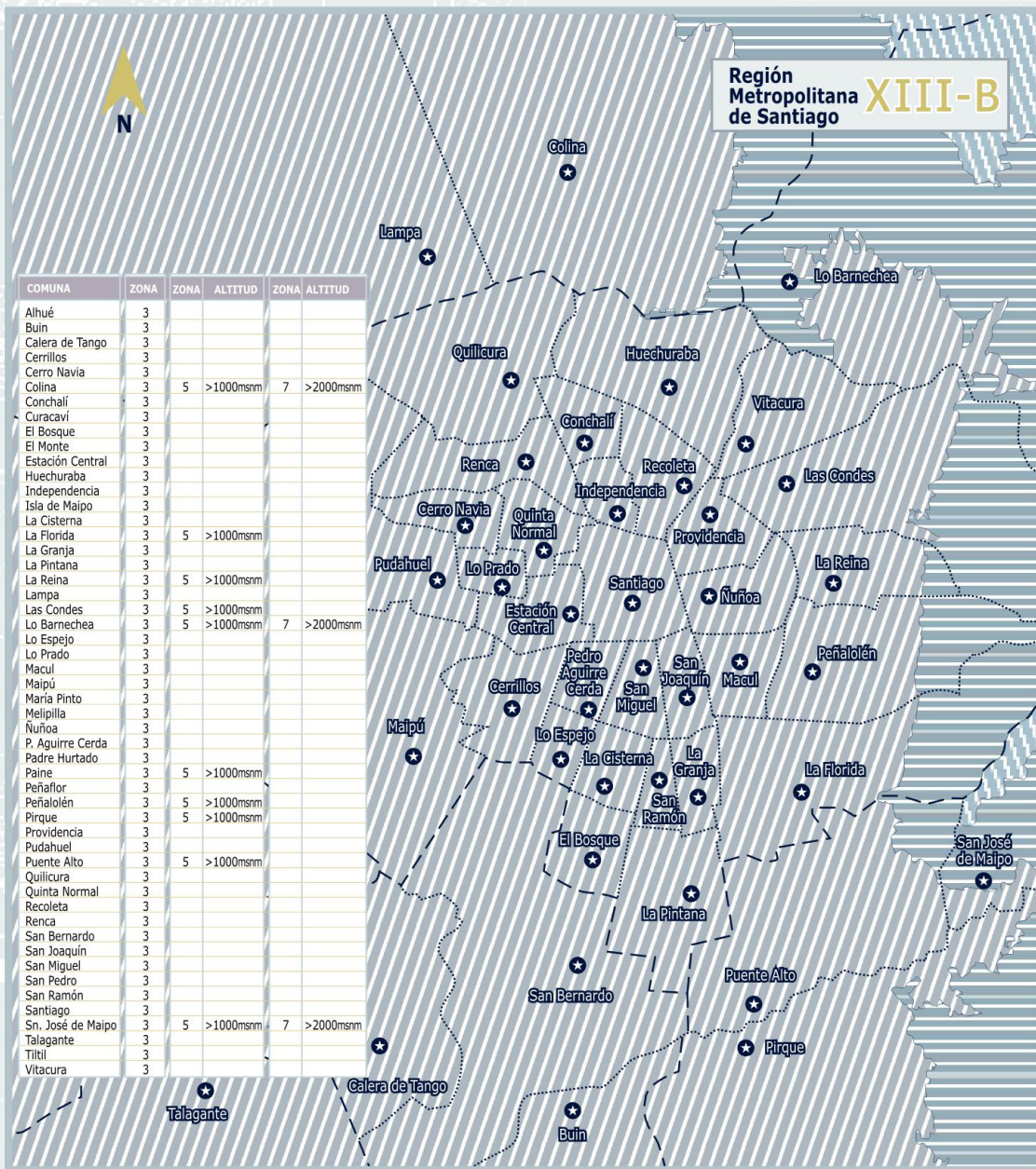


Figura C.13: Zonificación térmica Región Metropolitana de Santiago (a), Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU



Fuente: Cartografía, MIDEPLAN
Ajustada a imágenes de Satélite, Landsat 7 ETM
Coordenadas UTM, Datum WGS 84, Huso 19

Figura C.14: Zonificación térmica Región Metropolitana de Santiago (b), Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

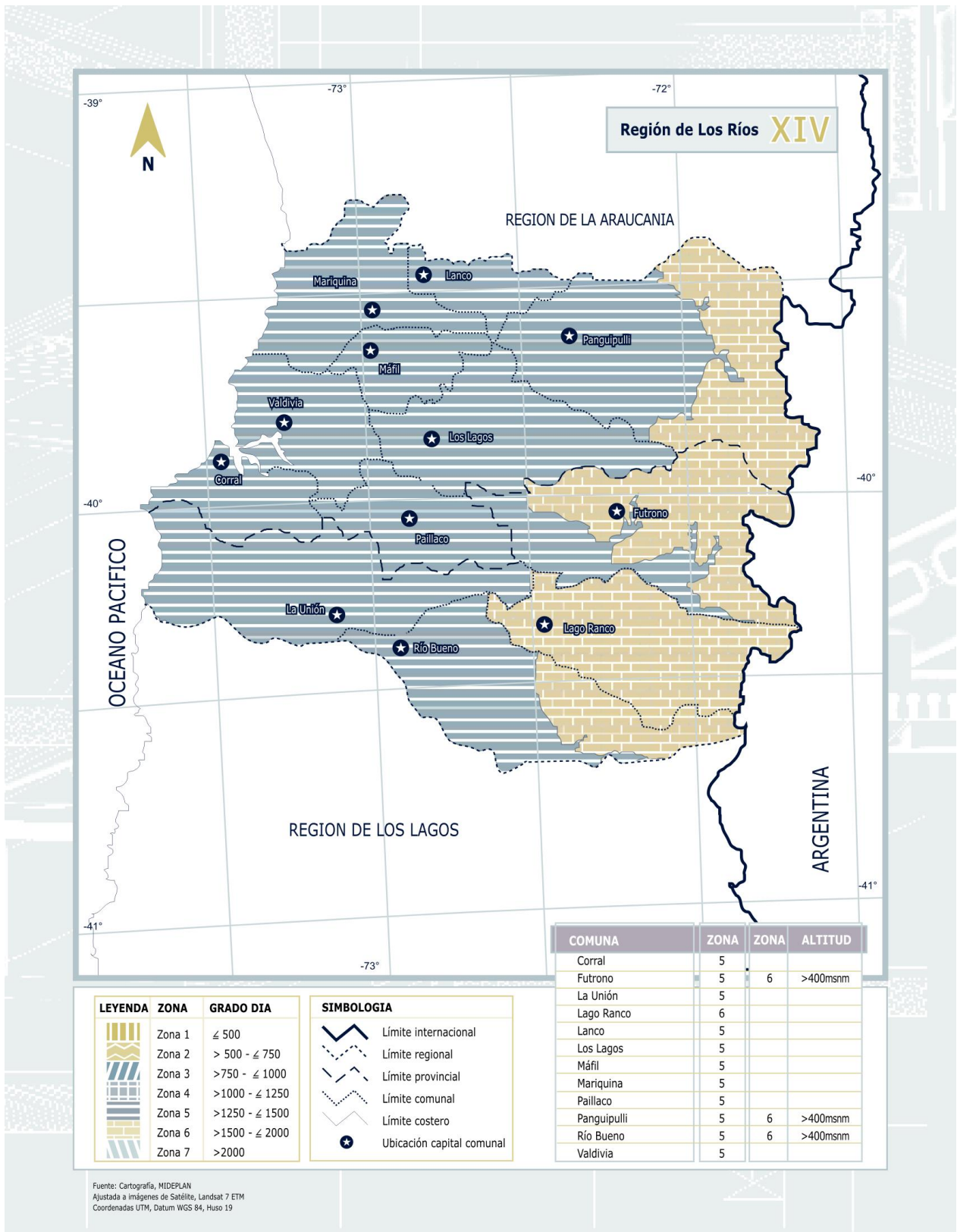
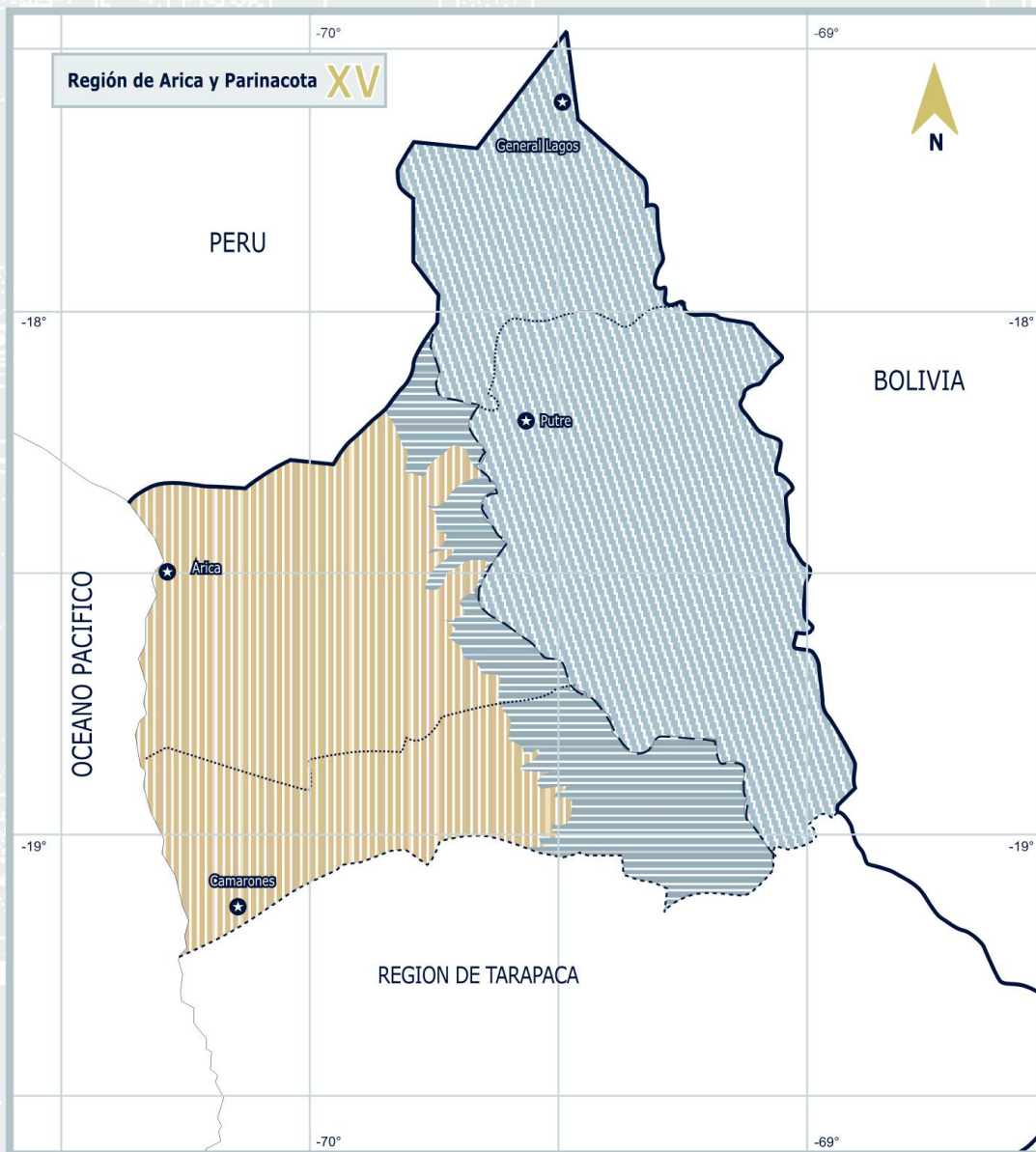


Figura C.15: Zonificación térmica Región de Los Ríos, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU



LEYENDA	ZONA	GRADO DIA	SIMBOLOGIA		
	Zona 1	≤ 500		Límite internacional	
	Zona 2	> 500 - ≤ 750		Límite regional	
	Zona 3	> 750 - ≤ 1000		Límite provincial	
	Zona 4	> 1000 - ≤ 1250		Límite comunal	
	Zona 5	> 1250 - ≤ 1500		Límite costero	
	Zona 6	> 1500 - ≤ 2000		Capital comunal	
	Zona 7	> 2000			

COMUNA	ZONA	ZONA	ALTITUD
Arica	1	5	>3000msnm
Camarones	1	5	>3000msnm
General Lagos	7		
Putre	7		

Fuente: Cartografía, MIDEPLAN
 Ajustada a imágenes de Satélite, Landsat 7 ETM
 Coordenadas UTM, Datum WGS 84, Huso 19

Figura C.16: Zonificación térmica Región de Arica y Parinacota, Manual de aplicación de la reglamentación térmica, MINVU

Apéndice D

Tablas de propiedades físicas mecánicas tableros OSB

PROPIEDADES FÍSICOMECÁNICAS PARA DISEÑO ESTRUCTURAL CON TABLEROS OSB APA

Calificación de Espacado por Espesor Nominal

Espesor nom (Espesor)	9.5 (3/8)	11.1 (7/16)	11.9 (3/8)	12.7 (1/2)	15.1 (3/4)	15.9 (3/4)	18.3 (3/4)	19.1 (3/4)	22.2 (3/4)	25.4 (1)	28.6 (1 1/8)
24.0											
24.16											
32.16											
40.20											
48.24											
16 oc											
20 oc											
24 oc											
32 oc											
48 oc											

Calificación Espacado para Revestimiento

Calificación Espacado para Pines

Calificación Espacado	Resistencia a la Flexión del tablero EI (N.m ²)		Rígidez a Flexión del tablero EIS (N.m ²)		Tensión Axial del tablero FA (N/m)	
Manufeco	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular
24.0	565	104	111	36	3357	1139
24.16	734	151	143	43	37934	1897
32.16	1083	235	165	61	4982	24074
40.20	2118	527	278	100	42311	30539
48.24	3765	861	371	150	58360	37205
16 oc	1412	320	185	67	37934	27721
20 oc	1977	381	213	93	42311	30539
24 oc	2825	768	285	143	48877	37205
32 oc	6120	2213	389	254	58360	47418
48 oc	10827	4660	704	445	81704	69303

Calificación Espacado	Compresión Axial del tablero FA(N/m)		Resistencia Axial del tablero EA(N/m)		Cizalla del tablero FA(N/m)		Rígidez del tablero a través del espesor GrV (N/m)		Cizalla del tablero a través del espesor FV(N/m)	
Manufeco	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular	Paralelo	Perpendicular
24.0	41582	36475	48876500	36475000	1897	1897	13572575	13572575	27145	27145
24.16	47418	36475	55442000	39393000	2189	2189	14623355	14623355	28896	28896
32.16	51795	45229	60548500	39393000	2407	2407	14623355	14623355	31523	31523
40.20	61278	58360	72950000	42311000	2991	2991	15489005	15489005	34150	34150
48.24	72950	62737	85351500	48147000	3648	3648	16812480	16812480	38529	38529
16 oc	58360	52524	65655000	39393000	2991	2991	14623355	14623355	29772	29772
20 oc	61278	58360	72950000	42311000	2991	2991	15286310	15286310	34150	34150
24 oc	72950	62737	85351500	48147000	3648	3648	16287090	16287090	37653	37653
32 oc	91917	90458	109425000	61278000	4377	4377	19264300	19264300	40280	40280
48 oc	118179	98483	119638000	67114000	5617	5617	27145150	27145150	53415	53415

Propiedades de la sección del panel

Espesor		Peso	Área	Momento de inercia	Módulo de Sección	Momento estático	Constante Cizalla
T	Pig	kg/m ²	A 10 ⁻³ m ² /m	IcA 10 ⁻⁶ m ⁴ /m	S 10 ⁻³ m ³ /m	Q 10 ⁻³ m ³ /m	Ib/Q 10 ⁻³ m ² /m
9.5	3/8	6.72	9.5	0.0724	15.1	11.3	6.4
11.1	7/16	7.66	11.1	0.1147	20.6	15.4	7.4
11.9	15/32	8.22	11.9	0.1407	23.7	17.7	7.9
12.7	1/2	8.79	12.7	0.1708	26.9	20.2	8.5
15.1	19/32	10.34	15.1	0.2855	37.9	28.4	10.1
15.9	5/8	10.87	15.9	0.3333	42.0	31.5	10.6
18.3	23/32	12.51	18.3	0.5068	55.5	41.7	12.2
19.1	3/4	12.95	19.1	0.5765	60.5	45.4	12.7
22.2	7/8	15.11	22.2	0.9152	82.3	61.7	14.8
25.4	1	17.27	25.4	1.3660	107.5	80.6	16.9
28.6	1 1/8	19.43	28.6	1.9452	136.1	102.0	19.1

OSB TEC 070319. Este catálogo reemplaza la información entregada en versiones anteriores. para mayor información, consulte con Sponite Técnico de LP y revise la vigencia de la información.

Figura D.1: Propiedades de tableros OSB, Catálogo técnico tableros OSB certificados APA

Apéndice E

Fichas técnicas para determinación de pesos propios de materiales

TABLA DE DIMENSIONES

Placa Gyplac	Tipo Borde	Espesor mm	Ancho m		Largo m			Peso Kg/m ²	Nº Placas /Pallet	
Placa Gyplac	ST BB	8	-	100	120	2,30	2,40	3,00	5,79*	80
Placa Gyplac	ST BR	10	-	100	120	2,30	2,40	3,00	6,94*	70
Placa Gyplac	ST BR	12,5	-	-	120	2,30	2,40	3,00	8,81	50
Placa Gyplac	ST BR	15	-	-	120	2,30	2,40	3,00	10,68	40
Placa Gyplac	RH BR	10	-	-	120	-	2,40	-	6,94	70
Placa Gyplac	RH BR	12,5	-	-	120	-	2,40	3,00	8,86	50
Placa Gyplac	RH BR	15	-	-	120	-	2,40	3,00	10,73	40
Placa Gyplac	RF BR	12,5	-	-	120	-	2,40	3,00	9,88	50
Placa Gyplac	RF BR	15	-	-	120	-	2,40	3,00	11,91	40
Placa Gyplac	ER BR	15	-	-	120	-	2,40	3,00	15,26	30
Placa Gyplac	ERH BR	15	-	-	120	-	2,40	3,00	15,16	30
Placa Doble Gyplac	ST BB	30	0,60	-	-	2,30	-	3,00	23,56	25
Placa Doble Gyplac	ST BR	30	0,60	-	-	-	2,40	-	23,56	25
Placa Triple Gyplac	ST BR	45	0,60	-	-	2,30	2,40	3,00	35,40	20
Fajas Gyplac	- BR	30	0,15	-	-	2,30	-	-	6,90	-

* Se considera Placa ST 8mm y ST 10mm de 1,20 x 2,40 m.

Nota: Las Placas Gyplac se venden en pallets.

Figura E.1: Tabla de dimensiones y pesos de yeso-cartón, ficha técnica Pizarreño

PRODUCTO	ESPESOR	FORMATO	PESO	Unidad x Pallet
OSB APA Plus/Guard/Protec	9,5 mm	1,22 x 2,44 mt	21,1 kg	84
	11,1 mm	1,22 x 2,44 mt	24,1 kg	72
	15,1 mm	1,22 x 2,44 mt	32,7 kg	53
	18,3 mm	1,22 x 2,44 mt	38,9 kg	45

Figura E.2: Tabla de dimensiones y pesos de OSB, Catálogo técnico tableros OSB certificados APA

Apéndice F

Informe ensayo acústico emitido por Laboratorio CPIA



LABORATORIO CPIA

Mediciones Acústicas

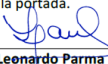
Dirección: Capitán Fuentes Nº 40, Ñuñoa, Santiago, Chile
Teléfono: (+562) 2886 5887, e-mail: laboratorio@cpi.cl
Web: www.cpi.cl

INFORME DE ENSAYO OFICIAL

10384/20-12-2018

Test Report

Informe Nº: Report Nº	244	Cotización ref. Nº: Proposal ref. Nº	422
Lugar de ensayo: Test location	Cámaras de Aislamiento Acústico del Laboratorio CPIA		
Identificación del ítem de ensayo y fabricante: Test subject's identification & manufacturer	EP 2 x 8@40 OSB 15,1Caucho 5 mm 800Kg/m3, E2E.		
Norma(s) de ensayo: Test standard(s)	NCh-ISO 10140 Acústica – Medición en laboratorio de la aislación acústica: - Parte 1 (2014): Reglas de aplicación para productos específicos - Parte 2 (2014): Medición de la aislación acústica aérea - Parte 3 (2014): Medición de la aislación acústica al ruido de impacto NCh2786.Of2003 (ISO 140-3:1995) Acústica – Medición de aislación acústica en construcciones y elementos de construcción – Mediciones en laboratorio de la aislación acústica aérea de elementos de construcción ISO 140-6:1998 Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors		
Nombre del cliente, empresa y dirección: Client's name, company & address	Juan Pablo Fierro, E2E, Camino a Melipilla 10651		
Fecha de emisión del informe: Date of issue	06-03-2020		
Número de páginas: Number of pages	6, incluyendo la portada.		


Leonardo Parma Salazar
Director



Firmado digitalmente por
LEONARDO RUBEN
PARMA SALAZAR

1. ALCANCE

Determinar mediante ensayo en laboratorio el Índice de Reducción Sonora, R y el Nivel de Presión Sonora de Impacto Normalizado, $L_{n,i}$, en bandas de tercio de octava, según el método descrito en las normas NCh-ISO 10140/2:2014, NCh2786.Of2003 (ISO 140-3:1995), NCh-ISO 10140/3:2014 y ISO 140-6:1998, para un EP 2 x 8@40 OSB 15,1Caucho 5 mm 800Kg/m³. A partir de estos resultados, determinar el Índice de Reducción Sonora Ponderado R_w y los términos de adaptación de espectro C y C_{tr} , expresado como $R_w (C;C_{tr})$, según la norma ISO 717-1:2013, así como el Nivel de Presión Sonora de Impacto Normalizado $L_{n,w}$ y el término de adaptación de espectro C_1 , expresado como $L_{n,w} (C_1)$, según la norma ISO 717-2:2013.

El ensayo se ha realizado a solicitud de Juan Pablo Fierro, en representación de E2E, con domicilio en Camino a Melipilla 10651, según lo acordado en el presupuesto nº 422.

2. DESCRIPCIÓN DEL ÍTEM DE ENSAYO

El ítem ensayado corresponde a un EP 2 x 8@40 OSB 15,1Caucho 5 mm 800Kg/m³ fabricado por E2E. El muestreo del ítem y/o sus componentes fue realizado por el solicitante. El detalle constructivo del ítem ensayado, según lo informado por el cliente, se indica en la Tabla 1 así como en la Figura 1.

El ítem fue construido en dependencias del cliente y transportado al laboratorio. El ítem no sufrió daño visible al ser recibido, manipulado al interior del laboratorio o durante el ensayo. Las dimensiones del ítem son 2,4 m x 4,2 m y 284,3 mm de espesor dividido en 3 partes de 1,222 m x 2,4 m y 1 de 0,534 m x 2,4 m

Tabla 1 – Descripción del ítem de ensayo

Nº	Elemento	Descripción
1	OSB	OSB 15,1 MM
2	MEMBRANA	CAUCHO 5 MM 800 KG/M3
3	OSB	OSB 15,1 MM
4	PINO	PINO BRUTO 2"X8"
5	LANA DE VIDRIO	LANA DE VIDRIO 11 KG/M3
6	OSB	OSB 15,1 MM
7	PINO	PINO CEPILLADO DE 2" X1"
8	YESO CARTON	YESO CARTON RF 15 MM
9	YESO CARTON	YESO CARTON RF 15 MM

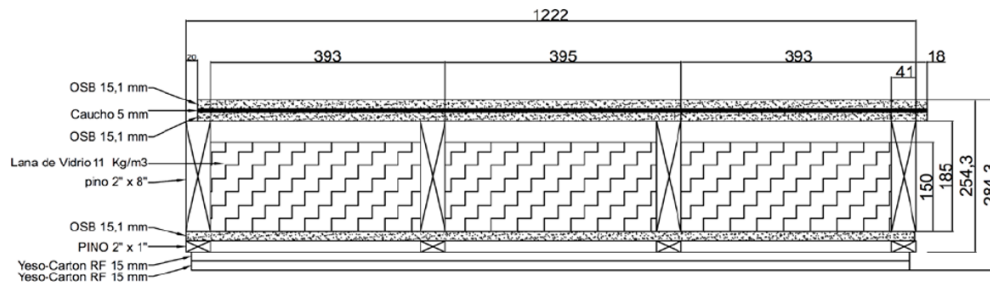


Figura 1 - Detalle constructivo del ítem de ensayo

3. METODOLOGÍA, INSTRUMENTACIÓN Y CONDICIONES DE ENSAYO

El ensayo se realizó el día 5 de Marzo de 2020 en las Cámaras de Aislamiento Acústico del Laboratorio CPIA. El ítem fue instalado en la abertura para pisos a cargo del personal del laboratorio. En la Figura 2 se observa un esquema de planta y corte de los recintos de ensayo. La cámara receptora cuenta con otras aberturas de ensayo las cuales fueron tapadas por sus respectivos elementos permanentes.

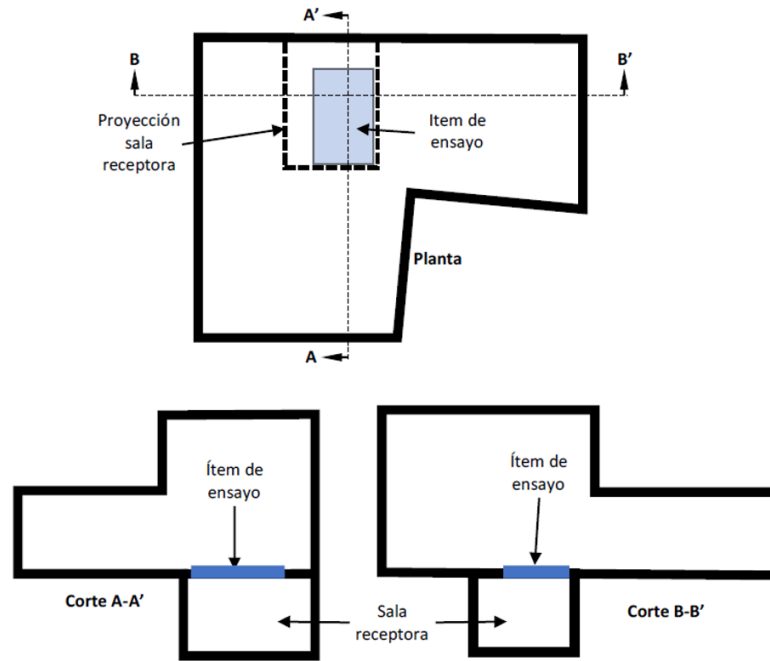


Figura 2 – Esquema de planta y corte de los recintos de ensayo

En ambos ensayos, las mediciones de nivel de presión sonora se realizaron utilizando la técnica del micrófono en movimiento continuo en una posición. Para el ensayo al ruido aéreo se utilizó un único altavoz en 2 posiciones, obteniéndose 4 mediciones del nivel de presión sonora en los recintos de ensayo. Como señal de prueba se utilizó ruido blanco. Para el ensayo al ruido impacto se utilizaron 4 posiciones de la máquina de impactos, obteniéndose 4 mediciones del nivel de presión sonora en el recinto de ensayo. En el recinto receptor se midió el ruido de fondo obteniendo así 1 medición. En este mismo recinto se midió además el tiempo de reverberación mediante la técnica de la fuente interrumpida utilizando un único altavoz, 3 posiciones de micrófono fijas y 2 decaimientos por posición. Todas las mediciones se realizaron en el rango de 100 a 5000 Hz. En la Tabla 2 se aprecia el instrumental utilizado y en la Tabla 3 las condiciones ambientales registradas durante el ensayo.

Tabla 2 - Instrumentos y equipos utilizados

Código	Instrumento	Marca/modelo	Nº Serie
SPK-102	Fuente Sonora Omnidireccional	Laboratorio CPIA	
EQU-001	Procesador de señales	Behringer Ultracurve PRO	
AMP-002	Amplificador	Soundtech PL200	
IMP-001	Máquina de impactos	Sources Line EM50	
SON-101	Sonómetro	Larson Davis 824	A0262
HBT-001	Medidor de humedad, presión y temperatura	Lutron MHB-382SD	
CAL-001	Calibrador	Larson Davis Cal-200	7377

Tabla 3 – Condiciones ambientales

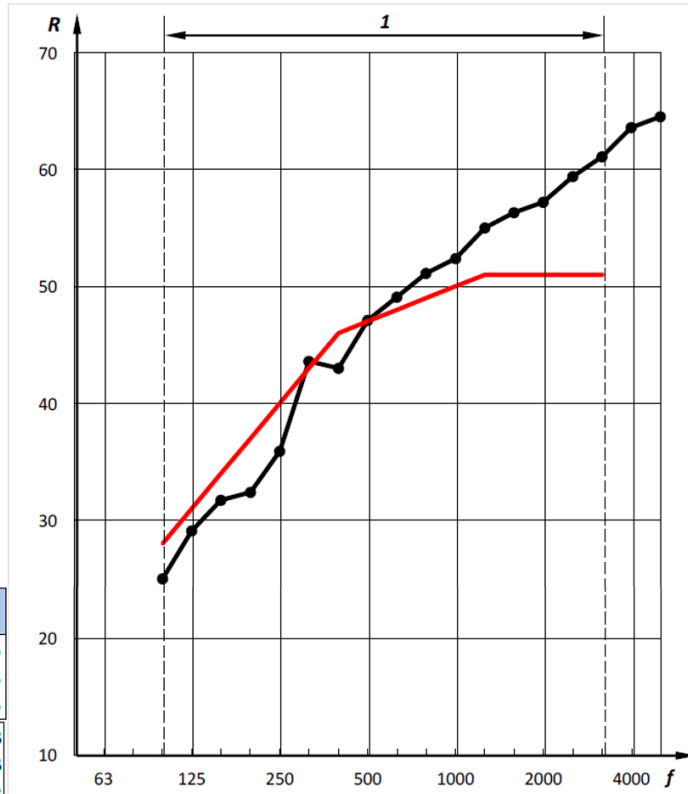
Temperatura	:	29,9 ± 0,5	°C
Humedad relativa	:	50,7 ± 4,0	%
Presión estática	:	946,9 ± 0,28	hPa

4. RESULTADOS

A continuación, en la Figura 3 se presentan los resultados del ensayo por bandas de tercio de octava y los valores obtenidos por la clasificación según ISO 717-1:2013. Por su parte, en la Figura 4 se presentan los resultados del ensayo por bandas de tercio de octava y los valores obtenidos por la clasificación según ISO 717-2:2013.

f Hz	R dB
50	-
63	-
80	-
100	25.0
125	29.1
160	31.7
200	32.4
250	35.9
315	43.6
400	43.0
500	47.1
630	49.1
800	51.1
1 000	52.4
1 250	55.0
1 600	56.3
2 000	57.2
2 500	59.4
3 150	61.1
4 000	63.6
5 000	64.5

Clasificación según ISO 717-1:2013 basado en un método de laboratorio	
$R_w (C; C_{tr})$	$= 47 (-1; -6) \pm 2,0$ dB
$R_w + C$	$= 46 \pm 2.1$ dB
$R_w + C_{tr}$	$= 41 \pm 2.5$ dB
$C_{50-3150}$	$=$ dB
$C_{50-5000}$	$=$ dB
$C_{100-5000}$	$= 0$ dB
$C_{tr,50-3150}$	$=$ dB
$C_{tr,50-5000}$	$=$ dB
$C_{tr,100-5000}$	$= -6$ dB



Leyenda: R : Índice de reducción sonora f : Bandas de frecuencia de $\frac{1}{3}$ de octava I : Rango de frecuencia para la clasificación según curva de referencia ISO 717-1:2013

Figura 3 – Resultados del ensayo de aislamiento acústico al ruido aéreo

Nota: Los resultados son válidos sólo para el elemento ensayado.

