

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA
VALPARAÍSO - CHILE



ENVOLVENTE HIGROTÉRMICA CONFORME A LA NUEVA REGLAMENTACIÓN TÉRMICA CHILENA
(DS No.15, 28/11/2025) PARA EDIFICACIONES RESIDENCIALES DE DOS PISOS
CON ESTRUCTURA DE PÓRTICOS Y ENTRAMADO PESADO DE MADERA.

FABIÁN AMED ASTUDILLO CID
MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE ARQUITECTO
PROFESOR GUÍA: LUIS FELIPE GONZÁLEZ BÖHME
AGOSTO 2026

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: ENVOLVENTE HIGROTÉRMICA CONFORME A LA NUEVA REGLAMENTACIÓN TÉRMICA CHILENA (DS No.15, 28/11/2025) PARA EDIFICACIONES RESIDENCIALES DE DOS PISOS CON ESTRUCTURA DE PÓRTICOS Y ENTRAMADO PESADO DE MADERA.

Nombre del candidato(a): FABIÁN AMED ASTUDILLO CID

Carrera / Grado: ARQUITECTURA / ARQUITECTO

Campus: CASA CENTRAL Departamento: ARQUITECTURA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Luis Felipe González Böhme, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

Luis 2026.10.

Felipe 13

González 09:17:14

Böhme -03'00"

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: _____ Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 13/10/2026 Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

El proyecto plantea la investigación y desarrollo de una envolvente higrotérmica conforme a la nueva reglamentación térmica chilena descrita en el DS No.15, 28/11/2025 para edificaciones residenciales de dos pisos con estructura de pórticos y entramado pesado de madera. El problema técnico abordado en este proyecto es la condensación superficial e intersticial que se produce con frecuencia en el sistema constructivo de entramado ligero al que se refiere de manera implícita la reglamentación chilena que, por lo general, ubica el material aislante en su eje estructural. A diferencia de las estructuras en base a paneles y entramados ligeros donde existen una amplia variedad de soluciones higrotérmicas, el sistema de entramado pesado de madera carece de opciones validadas bajo norma, lo que obstaculiza el desarrollo e implementación con este tipo de estructuras en el sur del país.

El objetivo es desarrollar una envolvente higrotérmica compuesta por paneles modulares autoportantes para los Complejos de Techumbre, Muro Perimetral, Puertas Opacas y Ventanas que satisfagan las exigencias para la macrozona térmica H-I. La metodología que se utilizara establece tres fases; una primera fase de revisión documental del estado del arte abordando patentes de invención, literatura científica del sistema porticado y literatura normativa higrotérmica chilena; una segunda fase de diseño y desarrollo de la envolvente constructiva modular de paneles autoportantes, estableciendo la vinculación entre la estructura y su envolvente junto a su respectiva definición estratigráfica; y por último, una fase tres de validación normativa e higrotérmica mediante memorias de cálculo en base a planillas desarrolladas por el ministerio de vivienda y urbanismo para los complejos exigidos en la macrozona térmica H-I.

El desarrollo de este proyecto de titulación busca consolidar una respuesta técnica y científica viable frente a los nuevos y exigentes desafíos de la física de la construcción en Chile, estableciendo una primera etapa para una futura fase de validación empírica mediante la construcción y monitoreo de un prototipo a escala real para la envolvente de una estructura porticada mediante entramado pesado de madera.

ABSTRACT

The project proposes the research and development of a hygrothermal building envelope in accordance with the new Chilean thermal regulations described in DS No. 15, 28/11/2025, for two-storey residential buildings, with a frame structure and heavy timber framing. The technical problem in the project addressed is the surface and interstitial condensation that frequently occurs in the lightweight timber frame construction system implicitly referred in the Chilean regulations, which generally place the insulating material along its structural axis. Unlike panel and lightweight frame structures, where a wide variety of hygrothermal solutions exist, the heavy timber frame system lacks validated options under the standard, hindering the development and implementation of this type of structure in the south of the country.

The objective is to develop a hygrothermal envelope composed of self-supporting modular panels for roofing, perimeter walls, opaque doors, and windows that meet the requirements for thermal macrozone H-I. The methodology that would be used establishes three phases: a first phase of documentary review of the state of the art, addressing invention patents, scientific literature on the framed system, and Chilean hygrothermal regulations; a second phase of design and development of the modular construction envelope of self-supporting panels, establishing the link between the structure and its envelope along with its respective stratigraphic definition; and finally, a third phase of regulatory and hygrothermal validation through calculation reports based on spreadsheets developed by the Ministry of Housing and Urban Development for the complexes required in thermal macrozone H-I.

The development of this degree project seeks to consolidate a viable technical and scientific response to the new and demanding challenges of construction physics in Chile, establishing a first stage for a future phase of empirical validation through the construction and monitoring of a full-scale prototype for the envelope of a framed structure using heavy timber framing.

GLOSARIO

A

Acondicionamiento del Aire: Proceso de tratamiento del aire para cumplir los requisitos de un espacio acondicionado controlando su temperatura, humedad, limpieza y distribución.

Aire Ambiente: Aire que rodea una edificación; la fuente del aire exterior que es introducido a una edificación.

Aire de Renovación: Cualquier combinación de aire exterior y de transferencia que apunta a reemplazar aire extraído o exfiltrado.

Aire Exterior: Aire que ingresa a una edificación a través de un sistema de ventilación, mediante aberturas diseñadas para una ventilación natural o infiltración.

Aire Extraído: Aire removido de un espacio y descargado a la parte exterior de la edificación a través de sistemas de ventilación naturales o mecánicos.

Aire Interior: Aire contenido dentro del espacio ocupado.

Área de infiltración efectiva (ELA): Es una representación de la calidad hermética de la envolvente. Este indicador asume que el área total de fuga corresponde a un orificio que cuantifica el área absoluta de los orificios en el edificio, combinando cada grieta y agujero presente en el edificio en un agujero idealizado. Este indicador depende de la presión a la que se está evaluando el ensayo, normalmente se entrega a 4Pa y a 50Pa.

B

Barrera de Vapor: Lámina o capa que presenta una resistencia a la difusión del vapor de agua comprendida entre 10 y 230MN·s/g.

Barrera Hidrofuga: Capa de material generalmente de espesor pequeño que ofrece una alta resistencia al paso de agua lluvia y una baja resistencia al paso de vapor.

Blower Door: Equipo que permite evaluar la hermeticidad al aire de un edificio. Consiste en una “puerta” que se adapta a las dimensiones de un vano de puerta o ventana, en la que se instala un ventilador que permite presurizar y despresurizar el edificio. Cuenta con un medidor de presión y de flujo, que permiten conocer la cantidad de aire impulsado por el ventilador. Se utiliza para determinar la tasa de fuga de aire según NCh 3295 Of. 2013.

C

Caja: Cavidad o mortaja poco profunda para alojar la sección completa de un extremo de madera para soportar carga; a menudo, pero no siempre, se combina con una mortaja estándar para aumentar la superficie de apoyo y asegurar la conexión mediante la espiga.

Calidad Aceptable de Aire Interior: Aire en el que no hay contaminantes conocidos en concentraciones dañinas como lo determinan Autoridades Competentes y en que una mayoría importante (80% o más) de las personas expuestas no expresa descontento.

Cambio de Aire por Hora: Se refiere a él volumen de aire que entra o sale de un edificio o espacio habitable en una hora, dividido por el volumen del edificio o espacio habitable.

Capa Freática: Primera capa de agua subterránea.

Carpintería: Trabajo de unir maderas mediante juntas de carpintería.

Coefficiente Superficial de Transferencia Térmica: Flujo que se transmite por unidad de área desde o hacia una superficie en contacto con el aire cuando entre éste y la superficie existe una diferencia unitaria de temperaturas. Se expresa en $W/(m^2 \cdot K)$.

Complejo de Muros Perimetrales: Conjunto de elementos constructivos que conforman los muros de una edificación, cuyo plano de terminación interior tiene una inclinación de más de 60° sexagesimales, medidos desde la horizontal.

Complejo de Piso Ventilado: Conjunto de elementos constructivos que conforman el piso de una edificación y que no están en contacto directo con el terreno. También se considerarán como pisos ventilados los planos horizontales inferiores de recintos cerrados que constituyan una prolongación del espacio interior hacia el exterior y los planos inclinados inferiores de escaleras o rampas cerradas que estén en contacto con el exterior.

Complejo de Puertas Opacas: Conjunto conformado por el marco de la puerta y la parte opaca de la hoja de esa puerta.

Complejo de Techumbre: Conjunto de elementos constructivos que conforman la techumbre de una edificación, cuyo plano de terminación interior tiene una inclinación de menos de 60° sexagesimales, medidos desde la horizontal. En el caso de mansardas o paramentos inclinados, se considerará complejo de techumbre todo elemento cuyo plano de terminación interior tenga una inclinación de 60° sexagesimales o menos, medidos desde la horizontal.

Complejo de Ventanas: Conjunto de elementos constructivos que conforman los cerramientos traslúcidos o transparentes de los vanos de una edificación, insertos en los complejos de muros perimetrales, techumbre, piso ventilado y puertas opacas.

Condensación: Paso del agua del estado gaseoso al estado líquido.

Condensación Intersticial: Condensación que se produce al interior de un elemento de la envolvente de la edificación, como consecuencia de que el vapor de agua que lo atraviesa alcanza la presión de saturación y por lo tanto la temperatura de rocío, en algún punto interior de dicho elemento.

Condensación Superficial: Condensación de vapor de agua sobre la superficie interna de los elementos que conforman la envolvente de la edificación, que se produce cuando la temperatura de dichas superficies es igual o menor a la temperatura de rocío del aire del recinto que limitan.

Condiciones Higrotérmicas: Son las condiciones de temperatura seca y humedad relativa que prevalecen en los ambientes exterior e interior para el cálculo de las condensaciones intersticiales.

Conductividad de la madera: Capacidad de la madera para transmitir las diferentes formas de energía.

Conductividad Térmica, λ : cantidad de calor que en condiciones estacionarias pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de material homogéneo de extensión infinita, de caras planas y paralelas y de espesor unitario, cuando se establece una diferencia de temperatura unitaria entre sus caras. Se expresa en $W/(m \cdot K)$.

Confort Térmico: Condición en la que las personas se sienten en equilibrio térmico con su entorno.

Cortavapor: Lámina o capa que presenta una resistencia a la difusión del vapor de agua mayor que $230MN \cdot s/g$.

D

Dren: Zanja o tubo filtrante relleno de grava para recibir aguas que se desean evacuar.

Duramen; Corazón: Parte central del tronco del árbol, constituida por células fisiológicamente inactivas y en las que los materiales de reserva han sido eliminados o convertidos. En la madera, generalmente, es de color más oscuro que la albura.

E

Edificación de Uso Residencial: Aquellas que contemplan preferentemente el destino vivienda, e incluye hogares de acogida, así como edificaciones y locales destinados al hospedaje, sea éste remunerado o gratuito.

Elemento Constructivo: Conjunto de materiales que debidamente dimensionados cumplen una función definida, tales como muros, tabiques, ventanas, puertas, techumbres, etc. [Art. 1.1.2., O.G.U.C.].

Elementos Perimetrales: Componentes de la edificación expuestos al ambiente exterior tales como complejos de techumbre, muros perimetrales, piso ventilado, puertas opacas y ventanas, y sobrecimiento en una edificación.

Entramado Pesado de Madera: Sistema estructural de madera prácticamente universal, que está presente a lo largo de toda la historia de la arquitectura en multitud de países. Su concepción estructural puede ser de dos clases: la de un sistema adintelado a base de pórticos de madera y la de entramados mixtos donde los postes se ubican a distancias más reducidas. Se utiliza la madera como elemento estructural puro. Es decir, la estructura es independiente del cerramiento y los esfuerzos principales actúan en dirección paralela a la fibra.

Envolvente: Superficie de un edificio que se encuentra en contacto con el exterior, incluye elementos opacos y translúcidos.

Envolvente Térmica: Conjunto que forman los elementos perimetrales de una edificación en los cuales se cumplen exigencias de acondicionamiento térmico y que, a su vez, la separan de un recinto no acondicionado o de elementos del ambiente exterior, tales como terreno, aire, agua, asoleamiento, temperatura, humedad u otros.

Espacio Habitable: Espacio de edificación que apunta a la ocupación constante de personas; tal espacio suele incluir áreas usadas para estar, dormir, comer y cocinar, pero que no suele incluir los cuartos de baños, servicios sanitarios, corredores, áreas de almacenamiento, armarios o cuartos de servicios.

Espesor de Aire equivalente frente a la Difusión del Vapor de Agua: Espesor de una capa de aire inmóvil que tiene la misma resistencia al vapor de agua que el espesor del material considerado.

Espiga: Proyección rectangular que resulta de cortar el extremo de una pieza de madera, flanqueada por uno o más hombros y dimensionada para encajar en una caja o mortaja.

Espiga pasante: Espiga que atraviesa la madera que une; puede cortarse al ras o extenderse más allá de la cara exterior de la pieza para ser encajada o bloqueada mediante diversos métodos.

F

Factor de Temperatura de la Superficie Interior: Es el cociente entre la diferencia de temperatura superficial interior y la del ambiente exterior y la diferencia de temperatura del ambiente interior y exterior.

Flujo Neto de Extracción: Flujo a través de un sistema de extracción menos el flujo de aire exterior de compensación a través de cualquier sistema de suministro que está acoplado con el sistema de extracción.

G

Grados-días: Suma de las diferencias entre una temperatura base de confort interior y la temperatura promedio diaria del exterior, siempre y cuando esta diferencia sea positiva, durante un periodo de tiempo determinado.

H

Hermeticidad al aire: Característica física de la envolvente que describe su capacidad para oponerse a las infiltraciones. Está relacionada con la materialidad de la envolvente y la calidad de la ejecución.

Hidrófugo: Producto o elemento que evita el paso de la humedad.

Higrómetro: Instrumento de medición que permite determinar la humedad atmosférica.

Humedad Absoluta: Cantidad de vapor de agua que contiene el aire. Se expresa en gramos por metro cúbico de aire seco.

Humedad Relativa: Cantidad de vapor de agua en el aire respecto a la humedad de saturación. Se expresa en porcentaje de la humedad de saturación.

Humedad Superficial crítica: Humedad relativa de la superficie que conduce a un deterioro de esta, en particular a la formación de moho.

I

Indicador n50 Tasa de Renovaciones de Aire (1/h; ach): Para una diferencia de presión constante de 50Pa, se indica la cantidad de veces que se renueva el volumen de aire contenido al interior de la edificación.

Infiltración de Aire: Entrada no controlada de aire a los espacios acondicionados a través de aberturas en techos, pisos y muros desde espacios sin acondicionamiento o el exterior y provocados por las mismas diferencias de presión que ocasionan la exfiltración

Intersticio: Espacio que media entre dos elementos o entre dos partes del mismo elemento de una envolvente.

M

Minvu: Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

O

OGUC: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

Orientación Global Teórica (OGT): Orientación que se aplica cuando la edificación posee menos del 60% de la superficie total de los muros perimetrales expuesta al ambiente exterior, a espacios contiguos abiertos o a recintos no acondicionados.

P

Pasador: Un vástago corto de madera dura y resistente, a menudo cónico, que se utiliza para unir y fijar la junta tradicional de caja y espiga en la construcción de entramados de madera; también llamado clavija o trонера.

Permeabilidad al aire: Se refiere a la capacidad de un componente de la envolvente de un edificio para permitir el paso de aire a través de él al estar expuesto a un diferencial de presión.

Permeabilidad al Vapor de Agua: Es la cantidad de vapor que pasa a través de la unidad de superficie de material de espesor uniforme cuando la diferencia de presión de vapor entre sus caras es la unidad.

Piso en Sótano: Piso que forma parte de una edificación en que parte de ésta se encuentra por debajo del nivel de

de terreno.

Piso a Nivel de Terreno: Piso que está constituido por una estructura en contacto con el terreno en la totalidad de su superficie, y situada al mismo nivel, o muy próximo, de la superficie del terreno exterior.

Piso Ventilado: Piso que se mantiene por encima del nivel de terreno, por ejemplo, apoyado sobre viguetas, vigas y emparrillados. Se aplica también al modelo de piso clásico sobre cámara de aire en la que el espacio bajo el piso está ventilado o no ventilado.

Plan de Descontaminación Atmosférica: Instrumento de gestión ambiental que tiene por finalidad recuperar los niveles señalados en las normas primarias y/o secundarias de calidad ambiental de una zona saturada por uno o más contaminantes.

Pórtico: Conjunto de postes, vigas y jabalcones perpendiculares a la cumbrera; generalmente ensambladas en el suelo y luego elevadas a su posición.

Poste: Componente de soporte vertical.

Presurización: Aumento en forma artificial y constante de la presión de aire en un recinto o edificio.

Psicrómetro: Instrumento que se utiliza para medir la humedad atmosférica y que consta de dos termómetros, uno de los cuales tiene el bulbo en contacto con agua.

Puente Térmico: Parte de la envolvente térmica de una edificación en la que su resistencia térmica, normalmente uniforme, se reduce por efecto de un elemento estructural o producto de su geometría.

Punto de Rocío: Temperatura a la cual el vapor de agua se condensa.

R

Recinto Acondicionado: Recinto cerrado o un conjunto de ellos, cuya envolvente térmica cumple con los requisitos de acondicionamiento térmico señalados en instrumentos oficiales del país.

Resistencia Térmica: Oposición al paso del calor que presentan los elementos de construcción. Corresponde al Inverso de la transmitancia térmica.

Resistencia Térmica de una Cámara de Aire No Ventilada: Resistencia térmica que presenta una masa de aire confinado (cámara de aire).

R100: (Según la norma NCh 2251) Valor equivalente a la resistencia térmica del material aislante multiplicada por 100.

S

Sistema de Purificación del Aire: Dispositivo o combinación de ellos aplicados para reducir la concentración de contaminantes en el aire, tales como microorganismos, polvos, humos, partículas respirables, otras partículas, gases y/o vapores en el aire.

T

Tamaño nominal: Dimensiones de una madera aserrada o labrada antes del dimensionamiento final; también, cómo se denomina la madera (5×7, 8×10, etc.); las dimensiones reales pueden ser mayores o menores que las nominales.

Tasa de Cambio de Aire: Flujo de aire en unidades de volumen por hora dividido por el volumen del espacio en que la tasa de cambio de aire se basa en unidades idénticas (usualmente expresadas en renovaciones de aire por hora).

Temperatura Mínima Aceptable: Temperatura superficial mínima interior para evitar la formación de moho.

Tirante: Elemento transversal y horizontal del pórtico, componente estructural que resiste la tendencia del techo a empujar las paredes hacia afuera. El tirante puede encontrarse en la parte superior de las paredes, donde recibe directamente el empuje de las vigas, o puede encontrarse hasta varios centímetros más abajo, donde se une a los postes principales mediante conexiones a tensión.

Transmitancia térmica: Es el flujo de calor, en régimen estacionario, dividido por el área y por la diferencia de temperaturas de los medios situados a cada lado del elemento que se considera.

V

Valor Límite de Hermeticidad: Valor límite definido por provincia del país, que define la capacidad de oponerse a las infiltraciones de aire de la envolvente. Su unidad de medida es cambios de aire por hora (1/h) a una presión diferencial de 50 Pa. A menor valor, mayor exigencia.

Vaporización: Paso del agua del estado líquido al estado gaseoso, ésta puede ser por medio de evaporación o ebullición.

Ventilación: Proceso de abastecer aire o remover aire de un espacio con el propósito de controlar los niveles de contaminación, la humedad o la temperatura dentro del espacio.

Ventilación Mecánica: Ventilación proporcionada por equipos impulsados mecánicamente, tales como ventiladores y sopladores movidos por motores eléctricos, pero no mediante equipos como ventiladores con turbinas eólicas o ventanas operadas mecánicamente.

Ventilación Natural: Ventilación proporcionada por efectos térmicos, eólicos o de difusión y que se realiza mediante puertas, ventanas u otras aberturas intencionales en la edificación.

Vigueta: Madera relativamente pequeña, generalmente espaciada en grupos para soportar un piso o techo.

Z

Zona: Porción de territorio regulado por un Instrumento de Planificación Territorial con iguales condiciones de uso de suelo o de edificación. [Art. 1.1.2., O.G.U.C.].

Zonas Climáticas: División del país hecha por la norma NCh1079 en la que se clasifican zonas de similares factores climáticos tales como temperatura, humedad, radiación solar, velocidad del viento, altitud, precipitaciones, entre otras.

Zonas Térmicas: División del país hecha por la OGUC en la que se clasifican zonas según la cantidad de grados-días anuales.

INDICE

Dedicatoria	
Agradecimientos	
Resumen	
Abstract	
Glosario	
Introducción	13
Problema	14
Solución	16
Objetivo general y específicos	18
Metodología	20
Resultado tecnológico comprometido	22
Desarrollo	23
Revisión documental del estado del arte	24
Prospección de Soluciones Técnicas y Propiedad Industrial	25
Análisis de la Literatura Científica del Sistema Estructural	40
Análisis de la Literatura Normativa Higrotérmica Chilena	48
Desarrollo de envolvente constructiva modular	60
Diseño de paneles autoportantes	61
Estratigrafías constructivas específicas	71
Vinculación estructural	76
Validación normativa e higrotérmica	86
Conclusión	118
Trabajo Futuro	122
Referencias	126
Anexos	132

INTRODUCCIÓN

PROBLEMA

El problema técnico abordado en esta investigación es la condensación superficial e intersticial que se produce con frecuencia en el sistema constructivo de entramado ligero al que se refiere de manera implícita la reglamentación chilena (DS No.15, 28/11/2025) que, por lo general, ubica el material aislante en su eje estructural. Se requieren nuevas soluciones de envolvente higrotérmica que aporten continuidad perimetral aislante y reduzcan el número de puentes térmicos usualmente presentes en la estructura del sistema constructivo utilizado.

SOLUCIÓN

La solución propuesta es una envolvente higrotérmica que aprovecha el sistema constructivo con estructura de pórticos y entramado pesado de madera para ubicar el material aislante fuera del eje estructural, mediante un sistema modular de paneles autoportantes para los Complejos de Techumbre, Muro Perimetral, Puertas Opacas y Ventanas (DS No.15, 28/11/2025), que aporta continuidad perimetral aislante y reduce el número de puentes térmicos usualmente presentes en la estructura del sistema constructivo de entramado ligero.

OBJETIVO GENERAL

OG. Desarrollar una envolvente higrotérmica compuesta por paneles modulares autoportantes para Complejos de Techumbre, Muro Perimetral, Puertas Opacas y Ventanas que satisfagan las exigencias para la macrozona térmica H-I (DS No.15, 28/11/2025), para un caso de uso de edificación residencial de dos pisos con estructura de pórticos y entramado pesado de madera.

Objetivos Específicos

OE 1. Desarrollar un sistema constructivo modular de la envolvente, para una edificación residencial de dos pisos con estructura de pórticos y entramado pesado de madera con tres variantes de cimentación, del tipo subterráneo, radier y dados de hormigón armado.

OE 2. Validar el cumplimiento normativo y desempeño higrotérmico para la macrozona térmica chilena H-I de un diseño específico de envolvente con paneles autoportantes, considerando las exigencias establecidas en el DS No.15, Res.Ex No.1802 y las NCh 1079:2022 , NCh 2251:2010, NCh 853:2021, NCh 3117:2018, NCh 851:2008, NCh 3076:2008, NCh 3137:2018, NCh 1973:2014, NCh 3295:2013, NCh 3296:2013, NCh 3297:2013, NCh 3308:2024, NCh 3309:2022.

METODOLOGÍA

Fase 1: Revisión Documental del Estado del Arte.

- 1.1. Prospección de Soluciones Técnicas y Propiedad Industrial.
- 1.2. Análisis de la Literatura Científica del Sistema Estructural.
- 1.3. Análisis de la Literatura Normativa Higrotérmica Chilena.

Fase 2: Desarrollo de una Envolverte Constructiva Modular.

- 2.1. Diseño de Paneles Autoportantes.
- 2.2. Diseño de Estratigrafías Constructivas Específicas.
- 2.3. Diseño de la Vinculación Estructural.

Fase 3: Validación Normativa e Higrotérmica.

- 3.1. Elaboración de memorias de desempeño higrotérmico en base a planillas MINVU para las exigencias establecidas en la macrozona H-I.

RESULTADO TECNOLÓGICO COMPROMETIDO

Resultado Tecnológico N°1: Paneles Autoportantes.

Paneles autoportantes para complejos de techumbre, muro perimetral, puertas opacas y ventanas de edificaciones residenciales de dos pisos construidas con entramado pesado de madera del tipo aporticado. Sujetos a elementos lineales-horizontales de la estructura, elaborados con capas materiales de revestimiento interior, barrera de vapor, placa de arriostamiento, estructura interna, aislación, barrera hidrofuga y revestimiento exterior.

Resultados previos sin protección intelectual.

Hito N°1: Memoria de desempeño normativo higrotérmico.

Resultado Tecnológico N°2: Conector y soporte estructural para los paneles autoportantes.

Pieza estructural para soportar y unir los paneles autoportantes a los elementos lineales-horizontales de la estructura de entramado pesado de madera, entregando una solución funcional para el traslado y sujeción de las instalaciones domiciliarias sin intervenir interiormente las capas materiales de los paneles.

Resultados previos sin protección intelectual.

Hito N°1: Análisis de esfuerzos mecánicos por método de elementos finitos (MEF) mediante ensayo de esfuerzo de Von Mises.

DESARROLLO

La validación técnica y normativa de una envolvente higrotérmica eficiente, adaptada a las exigencias contemporáneas de una edificación residencial en madera requiere un análisis integral del conocimiento disponible. Para garantizar la originalidad, el rigor científico y la viabilidad legal de esta propuesta, la revisión documental del estado del arte se ha estructurado de manera sistemática en tres etapas consecutivas y complementarias, que constituyen el soporte teórico y tecnológico de la investigación:

Etapas I: Prospección de Soluciones Técnicas y Propiedad Industrial.

Esta primera etapa tiene como objetivo mapear el panorama de soluciones actualmente investigadas, existentes y con propiedad industrial. En torno a este objetivo el análisis se desarrolla de forma concéntrica en tres subcategorías:

1.- Soluciones alternativas actualmente investigadas: A continuación, se presentan proyectos en desarrollo en la misma línea de investigación u otras líneas que apunten a resolver el problema identificado, considerando información nacional e internacional actualizada sobre publicaciones y proyectos tecnológicos financiados tanto por la agencia nacional de investigación y desarrollo (ANID), centros de investigación y la academia.

Código: ID25I10345

Título: Avances en materiales de construcción: Membrana Bio basada para aplicaciones en la envolvente de edificaciones en madera.

Línea Temática: Resiliencia a crisis climática, gestión y uso eficiente del agua.

Entidad Beneficiaria: Universidad del Bio-Bio.

El proyecto aborda la problemática de la dependencia de materiales fósiles en la construcción, especialmente en las membranas de envolventes para edificaciones de madera, que actualmente utilizan materiales derivados del petróleo como asfalto y polietileno. Estos materiales tienen una alta huella de carbono, baja biodegradabilidad, y afectan negativamente el desempeño higrotérmico de los edificios. Se desarrolla una membrana biobasada en base a nanocelulosa funcionalizada que actúe como barrera de vapor y gestione la humedad en las edificaciones de madera. Se busca mejorar significativamente el desempeño higrotérmico de las edificaciones mediante la funcionalización química de la nanocelulosa, previniendo la proliferación de mohos y hongos, y ofrecerá una alternativa sostenible a las soluciones sintéticas convencionales.

Código: ID25I10310

Título: Herramienta basada en ciencia para la especificación en fase de diseño de soluciones viables para la hermeticidad al aire de edificaciones, compatibles con las exigencias de clases de infiltración de aire aceptables de la última actualización de la OGUC.

Línea Temática: Resiliencia a crisis climática - adaptación de industrias al cambio climático y economía circular.

Entidad Beneficiaria: Universidad del Bio-Bio.

El objetivo es resolver una brecha crítica en la construcción chilena, que busca cómo anticipar de forma científica en un software de diseño el comportamiento de las uniones, materiales y envolventes para cumplir con las exigencias obligatorias de infiltración de aire que estipula la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). Esto evita fallas post-construcción, reduce el gasto en calefacción y mitiga problemas de condensación superficial e intersticial.

Código: ID25I10151

Título: **Herramienta informática basada en ciencia para la especificación de diseño de soluciones viables para reducir riesgos de aparición de moho y hongo en edificaciones nuevas y existentes, compatible con la actualización del art. 4.1.10 de la OGUC.**

Línea Temática: Resiliencia a crisis climática - adaptación de industrias al cambio climático y economía circular.

Entidad Beneficiaria: Universidad del Bio-Bio.

El proyecto busca generar un software que impida la proliferación biológica (moho y hongos) dentro de los muros y techos debido a la humedad, resguardando la salud de los habitantes y la vida útil de los materiales de construcción exigidos en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC).

2.- Soluciones existentes en el mercado: El mercado de la construcción residencial en Chile ofrece diversas tecnologías estandarizadas para cumplir con los estándares de eficiencia energética. Sin embargo, la mayoría de estos productos están diseñados para sistemas constructivos convencionales. A continuación, se analizan tres variantes tecnológicas predominantes en el mercado, detallando sus características, su funcionamiento y sus limitaciones frente a este proyecto:

Variante A: Sistema de paneles estructurales aislantes (Sistema SIP)

Características principales: Compuestos por un núcleo aislante de poliestireno expandido (EPS) o poliuretano (PUR) pegado entre dos capas de madera técnica (OSB).

Funcionamiento comercial: Operan en el mercado como muros portantes continuos de formato modular. Se comercializan como módulos prefabricados de rápido montaje que prometen entregar un muro completamente aislado y cerrado en un solo paso.

Incompatibilidad técnica con el proyecto: Aunque se utilicen para revestir el entramado pesado, su gran vulnerabilidad radica en la pérdida de sección aislante por el paso de las instalaciones. Al no contar con una cavidad técnica exclusiva para redes eléctricas o sanitarias, los operarios o constructores en obra se ven obligados a calar, derretir o perforar el núcleo de poliestireno interior para pasar las tuberías y cajas de conexión. Este procedimiento reduce drásticamente el espesor real del aislamiento en puntos clave de la vivienda. Como consecuencia, se generan puentes térmicos localizados y roturas severas en la barrera de vapor, lo que impide asegurar el estándar continuo y estricto que exige el Decreto Supremo N°15 y eleva el riesgo de condensaciones al interior del panel.

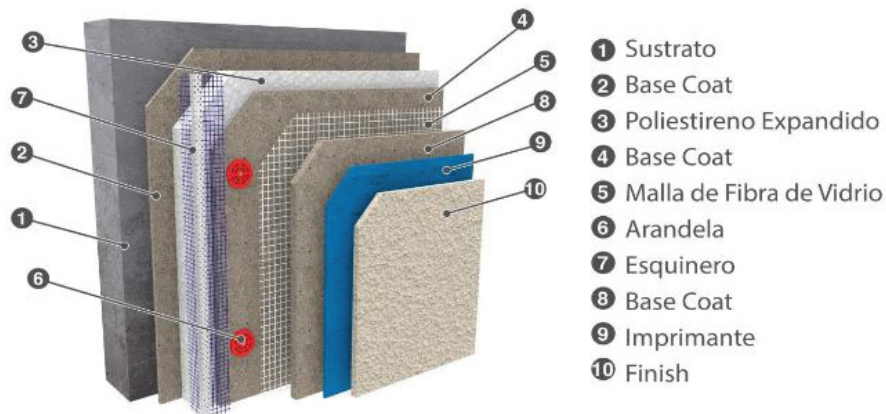


Variante B: Sistema de aislamiento térmico exterior continuo (Sistema EIFS)

Características principales: Capas de aislamiento que se fijan por la cara exterior de los muros, generalmente de poliestireno de alta densidad. Incluyen mallas de fibra de vidrio y capas de morteros elásticos para recibir el acabado final. En fachadas ventiladas, incorporan una subestructura que separa el revestimiento del muro para crear una cámara de aire.

Funcionamiento comercial: Se comercializa como una “segunda piel” protectora que envuelve por completo el perímetro del edificio. Su objetivo principal en el mercado es eliminar los puentes térmicos superficiales, asumiendo que el edificio cuenta con fachadas ciegas o planos continuos como muros de albañilería, hormigón o grandes emplacados, se busca asegurar que la estructura interna quede completamente abrigada y protegida de la intemperie.

Incompatibilidad técnica con el proyecto: La arquitectura de este proyecto se estructura mediante pórticos de entramado pesado, lo que significa que está compuesta por elementos lineales (postes y vigas) que dejan grandes vacíos o bahías entre sí. El sistema EIFS presenta una incompatibilidad geométrica radical con esta lógica, ya que no puede aplicarse en el aire ni cubrir luces vacías sin un soporte físico de fondo. Para poder utilizar EIFS en un entramado pesado, se requeriría construir una subestructura o muro secundario continuo que rellene los vacíos entre pórticos solo para sostener el revestimiento. Esto duplica los costos, añade peso innecesario, aumenta los tiempos de obra y también contradice la eficiencia del sistema lineal propuesto a utilizar como base estructural.



Variante C: Sistemas de Fachada Suspendida Tipo "Muro Cortina" y Fijaciones Mecánicas Conectoras.

Características Principales: Envolventes perimetrales que no cargan el edificio, sino que cuelgan o se anclan a la estructura principal. Utilizan subestructuras generalmente de perfiles metálicos y conectores mecánicos regulables para fijar paneles opacos o vidriados. Trasladan todo el paquete de aislamiento y protección hacia el exterior de la línea de pilares.

Funcionamiento Comercial: En el mercado tradicional, el muro cortina se vende como una solución de fachada continua de alto rendimiento para edificios corporativos de hormigón o acero. Su gran ventaja comercial es que absorbe los movimientos del edificio mediante juntas de dilatación integradas y permite nivelar la fachada de forma milimétrica gracias a sus anclajes regulables.

Incompatibilidad Técnica con el Proyecto: Puentes térmicos de penetración: Las fijaciones comerciales atraviesan todo el espesor de la fachada para conectar el exterior con las vigas y pilares. Esto introduce el frío directo al nodo de los componentes de madera, generando condensación localizada que infringe el D.S. N° 15.

Oportunidad de Desarrollo: Plantea una conexión oculta y protegida que busque diseñar un sistema de anclaje empotrado que se fija a la estructura lineal pero no sobresale hacia el exterior. Al quedar confinado detrás de la capa continua de aislamiento térmico exterior, el conector permanece a temperatura de confort, eliminando físicamente el puente térmico y anulando cualquier riesgo de condensación.

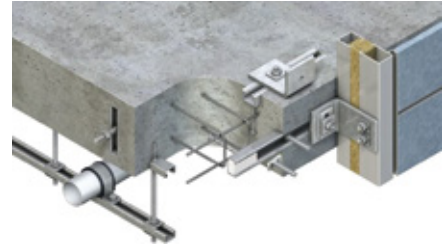
En relación con el proyecto de investigación se han analizado dos referentes industriales líderes a nivel global. Ambos desarrollan soluciones de ingeniería para la fijación de fachadas ligeras y muros cortina que constituyen un antecedente directo para resolver los encuentros críticos entre los elementos estructurales primarios y los sistemas envolventes.

HALFEN (Langenfeld, Alemania) – Sistema HSW (Halfen Curtain Wall)

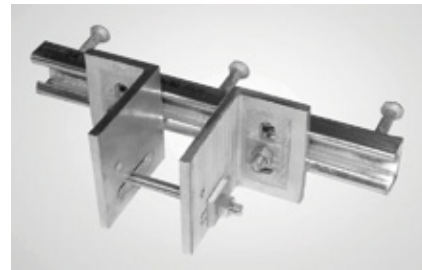
La tecnología de HALFEN se basa en un concepto de anclaje continuo y regulable mediante canales de acero que se insertan de forma previa al vaciado del hormigón.

Mecanismo de Funcionamiento: El sistema HSW utiliza canales perimetrales empotrados en los cantos o en las caras superiores de las losas de hormigón armado. Estos canales reciben pernos de cabeza de martillo (T-bolts) que permiten un posicionamiento milimétrico a lo largo del eje horizontal del canal.

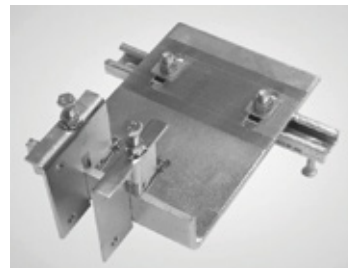
Aporte al Proyecto: Este sistema es clave como antecedente para resolver la tolerancia constructiva y la transferencia de cargas vectoriales como lo son el peso propio de la fachada y las presiones de viento hacia la estructura soportante, eliminando la necesidad de perforaciones posteriores en el hormigón y reduciendo los tiempos de montaje en obra.



Canal empotrado
en canto de losa.



Canal empotrado
en cara superior
de losa.



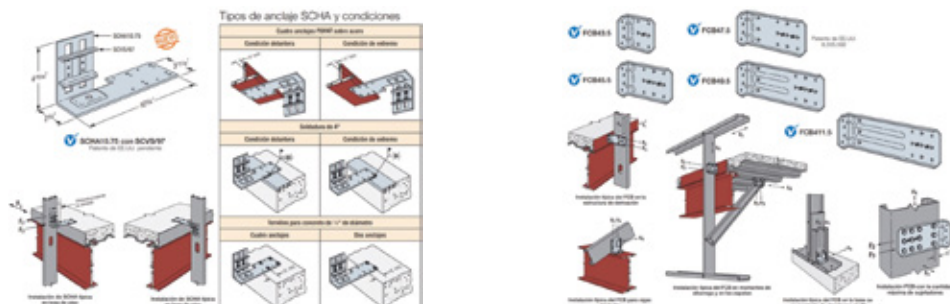
Simpson Strong-Tie (California, Estados Unidos) – Conectores de Abrazadera Deslizante y Fija

Simpson Strong-Tie ha desarrollado y patentado una línea avanzada de conectores y abrazaderas de acero galvanizado para estructuras ligeras de acero y madera diseñados específicamente para el anclaje de muros cortina.

El valor de esta tecnología radica en su capacidad para segregar los esfuerzos mecánicos a través de dos variantes fundamentales:

Variante de abrazadera fija diseñada para actuar como el punto de anclaje rígido o de carga. Soporta tanto las cargas muertas (peso propio del panel de fachada) como las fuerzas laterales del viento, transmitiéndolas directamente a la estructura principal.

Variante de abrazadera deslizante que incorpora ranuras longitudinales alargadas en el conector, combinadas con bujes o arandelas de baja fricción. Su función principal es absorber las deflexiones verticales de la estructura como asentamientos generados por sismos o cargas vivas en las losas como también podrían ocurrir por dilataciones térmicas del material, evitando que estos movimientos se transmitan al panel de fachada y provoquen fallas estructurales o roturas de vidrios.



La integración de estos dos referentes en el estado del arte permite fundamentar el diseño de los conectores de la propuesta bajo dos principios técnicos. Uno de flexibilidad de montaje y otro de deslizamientos perpendiculares al plano de cerramiento, permitiendo absorber desviaciones en los encuentros de estos componentes, y como segundo aspecto no menos relevante entregar soluciones eficientes de fijaciones para lograr una correcta estanqueidad y aislamiento para la envolvente.

3.- Análisis de la Propiedad Industrial: El proceso de prospección y mapeo de antecedentes se ejecutó mediante consultas directas en dos plataformas de registros públicos de patentes. A nivel nacional, se utilizó el motor de búsqueda del Instituto Nacional de Propiedad Industrial de Chile (INAPI) para identificar tecnologías y modelos de utilidad registrados para el mercado constructivo local. A nivel internacional, la búsqueda se expandió a través de la base de datos PATENTSCOPE de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO), analizando solicitudes globales e innovaciones asociadas en materia de Patentes.

Para acotar el universo de patentes a la naturaleza específica de la investigación, se estructuraron cadenas de búsqueda que cruzaron descriptores térmicos y estructurales. La exploración se centró en los términos "sistema aporticado", "entramado de madera", "postes y vigas", "ensambles carpinteros", entre otros. Estos conceptos estructurales se combinaron con descriptores del tipo "envolvente higrotérmica", "envolvente térmica", "aislamiento continuo", "puente térmico", entre otros. Este cruce técnico permitió rastrear cómo las invenciones vigentes resuelven la continuidad del flujo de temperaturas y condiciones higrotérmicas en edificaciones, analizando específicamente las patentes que proponen soluciones para mitigar aspectos como puentes térmicos y riesgos de condensaciones en los nodos críticos de encuentros entre estructuras y envolventes. De este modo, los resultados obtenidos sirvieron como línea de base técnica para contrastar el salto de diseño de la envolvente propuesta frente a las exigencias térmicas del D.S. N° 15.



Patente Analizada N°1 [INAPI]

Nombre(s) del(os) inventor(es):

PÉREZ-AGUIRRE SIMUNOVIC, Catalina [RUT 17.316.914-0]

RAMÍREZ SÁNCHEZ, Claudio Andrés [RUT 14.472.374-0]

Título de la patente: ENVOLVENTE TÉRMICA PARA EDIFICACIONES.

País y número de la patente (N° registro): Chile / [En trámite]

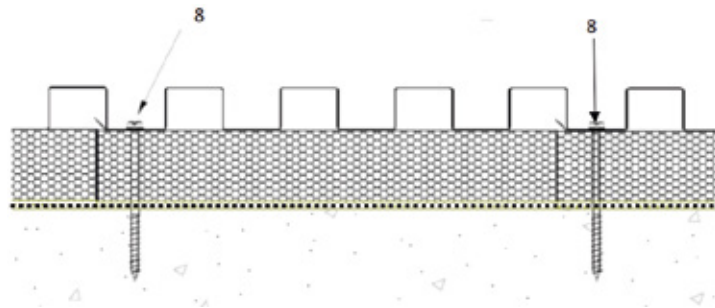
Clasificación de la patente (IPC): E04C2/00, E04C2/08

Fecha de concesión oficial: 2025-02-21

Número y fecha de solicitud de la patente: 202403108 / 2024-10-14

Estado: En trámite

Resumen: La presente concierne a una envolvente térmica para edificaciones o construcciones correspondiente a un panel prefabricado multicapa. En una primera modalidad, el panel se compone principalmente de un revestimiento exterior de acero, un núcleo aislante y una barrera de vapor, en una segunda modalidad el panel se compone principalmente de un revestimiento exterior de acero, un núcleo aislante, una barrera de vapor y un revestimiento interior no metálico. **La invención tiene como finalidad proporcionar un panel aislante que evita la condensación intersticial en base a un revestimiento exterior de acero perforado, lo que permite mantener las propiedades aislantes del panel y evitar la proliferación de moho u hongos en las soluciones constructivas.**



Nombre(s) del(os) inventor(es): GARCIA-GALLARDO Sanz Prospero

Título de la patente: Sistema de ventilación con transferencia térmica a cerramientos con cámara en edificios.

País y número de la patente (N° de publicación): España / 3061644

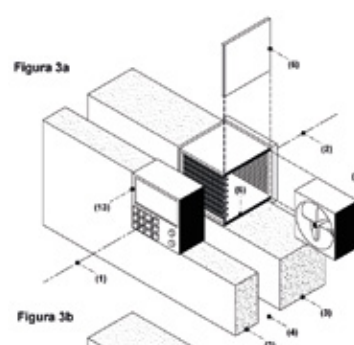
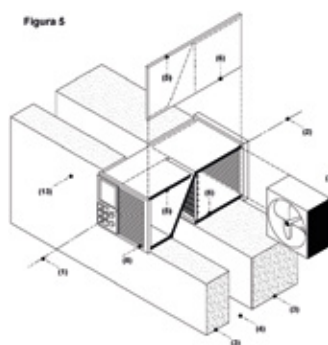
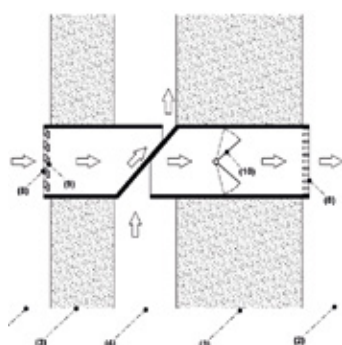
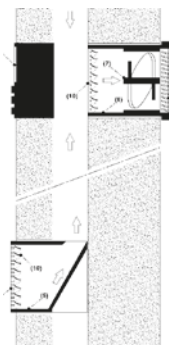
Clasificación de la patente (IPC): F24F 12/00, F24F 13/0227, F24F 13/0272, F24F 7/10, F24F 7/007, F24F 11/0001.

Fecha de concesión oficial: 2018-12-21

Número y fecha de solicitud de la patente: 202531176 / 2025-12-11

Estado: Aprobada

Resumen: La invención se refiere a un sistema de ventilación para edificios que utiliza cámaras constructivas existentes o convencionales como elementos activos de transferencia térmica, sin requerir su modificación. El sistema canaliza aire del local interior hacia la cámara constructiva y, desde ésta, al ambiente exterior, empleando la cámara como zona de intercambio térmico y preservando su comportamiento higrotérmico pasivo cuando el sistema está inactivo. El sistema puede configurarse como módulo compacto, incorporar un modo de ventilación directa que permite el paso de aire entre interior y exterior sin circulación apreciable por la cámara, e integrar sensores ambientales, control automático, programación horaria, registro de datos y un conducto envolvente que facilita la instalación, extracción o sustitución de los módulos y conductos.



Patente Analizada N°3 [INAPI]

Nombre(s) del(os) inventor(es): MUÑOZ PARRA, Segundo Bernardino [RUT 12.552.698-5]
Título de la patente: TBBS - THERMAL BRIDGE BREKEAGE SYSTEM. [SISTEMA de ROTURA o BLOQUEO de PUENTES TÉRMICOS].

País y número de la patente (N° registro): Chile / 60534

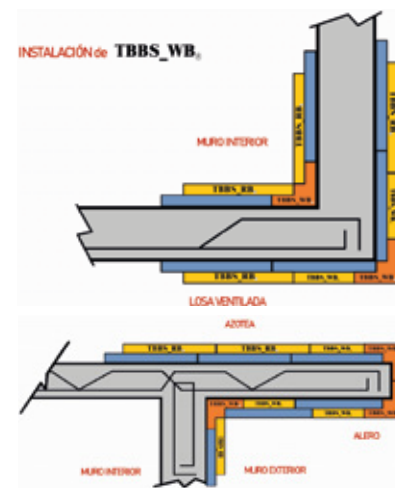
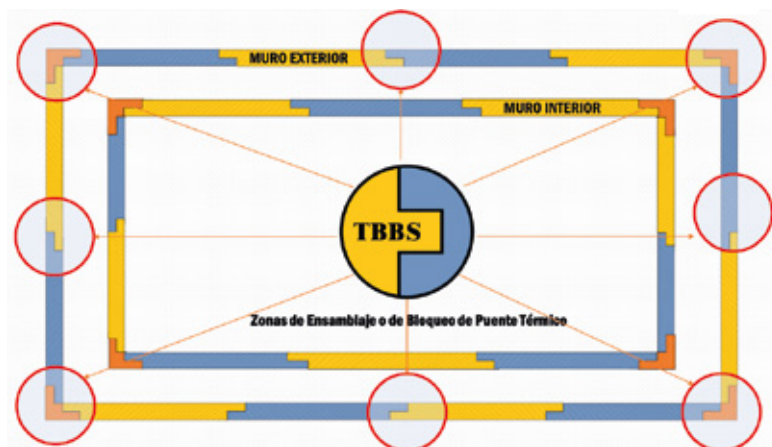
Clasificación de la patente (IPC): E04B1/74, E04B1/76, E04B1/78, e04b1/80, e04b1/88, F16L59/00

Fecha de concesión oficial: 2018-12-21

Número y fecha de solicitud de la patente: 201802352 / 2018-08-17

Estado: Aprobada

Resumen: Sistema de bloqueo de puentes térmicos caracterizada por tener seis productos aislantes de alta densidad y de estructura específica que poseen áreas de ensamble en sus extremos, los que permiten bloquear los puentes térmicos presentes en las juntas de construcción de los elementos aislantes que se encuentran en contacto con la superficie de la estructura, con áreas de ensamble que combinadas generan el sistema de bloqueo de puentes térmicos asegurando la eficiencia energética de distintos tipos de edificaciones.



Nombre(s) del(os) inventor(es): LEONARDI Daniel Omar

Título del modelo: PANEL MODULAR PARA TECHO, AUTOPORTANTE, HIDRÓFUGO, TÉRMICA Y ACÚSTICAMENTE AISLANTE Y RECUBRIMIENTO DE TECHO LOGRADO CON UNA PLURALIDAD DE DICHOS PANELES.

País y número de la patente (N° registro): Argentina / 102742

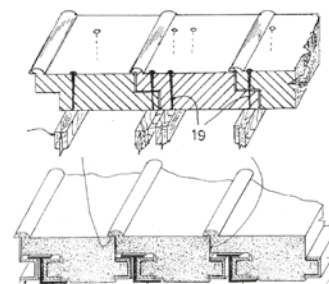
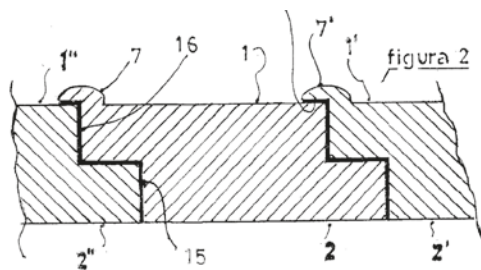
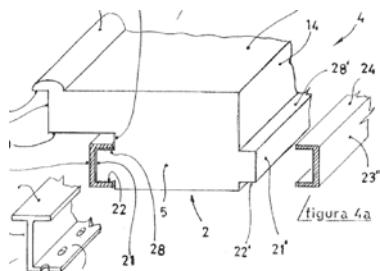
Clasificación de la patente (IPC): E04D 3/35, E04D 3/32, E04D 1/28.

Fecha de concesión oficial: 22.03.2017

Número y fecha de solicitud de la patente: P150103805 / 2015-11-20

Estado: Aprobada

Resumen: Panel modular para techo, auto portante, hidrófugo, térmica y acústicamente aislante, definido por un cuerpo monolítico de un mismo material, preferentemente poliuretánico, que presenta una superficie superior expuesta al exterior y una superficie inferior expuesta al interior del recinto a techar. Sobre uno de los costados laterales del panel se tiene por lo menos un primer escalón longitudinal, y sobre el lado opuesto tenemos un segundo escalón especularmente invertido y complementario al primero. Desde la superficie superior y en correspondencia con el primer escalón, se proyecta en voladizo una pestaña longitudinal la cual presenta una superficie inferior coplanar con dichas superficie superior del panel. El recubrimiento de techo logrado con una pluralidad de dichos paneles es logrado por una sucesión de paneles, con la pestaña apoyando sobre la superficie superior del inmediatamente adyacente, asentando el escalón de un panel sobre el escalón especularmente invertido y complementario del panel lateralmente adyacente y colocando un elemento sellante en las uniones entre panel y panel, -apoyando esta pluralidad de paneles sobre medios estructurales de techo.



Modelo de Utilidad Analizado N°1 [INAPI]

Modelo de utilidad conocido comunmente como “Pequeña Patente” hace referencia a un modelo-que protege mejoras, adaptaciones o configuraciones funcionales de productos ya existentes.

Nombre(s) del(os) inventor(es):

CORTÉS ALCAPIO, Fernando Javier [RUT 14.109.406-8]

BEAUMONT SEPÚLVEDA, Juan Carlos

Título del modelo: PANEL PREFABRICADO DE ACERO GALVANIZADO CON RUPTURA DE PUENTE TÉRMICO Y CÁMARA DE AIRE.

País y número de la patente (N° registro): Chile / -

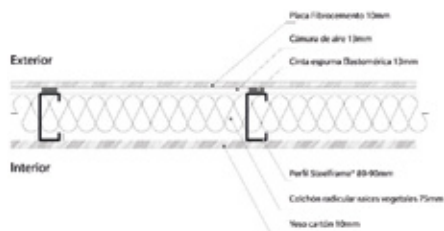
Clasificación de la patente (IPC): E04B1/74, E04B1/76, E04B2/00, E04C2/26

Fecha de concesión oficial: 2026-02-06

Número y fecha de solicitud de la patente: 202503730 / 2025-11-26

Estado: En trámite

Resumen: Modelo de Utilidad referido a un sistema constructivo industrializado de paneles prefabricados con estructura de acero liviano (steel frame), diseñado para eliminar puentes térmicos y prevenir condensación. El panel comprende perfiles de acero galvanizado, aislación térmica interior y placas de revestimiento. La invención se caracteriza por una configuración de ruptura térmica ("R") que integra una **cinta de espuma elastomérica EPDM de 13 mm adherida a la cara exterior del perfil** y una cámara de aire de 13 mm generada por la separación del revestimiento exterior. Esta disposición dual incrementa la resistencia térmica en la zona del perfil en más de un 120% respecto a soluciones convencionales y mantiene la temperatura superficial interior por sobre el punto de rocío, eliminando la condensación superficial e intersticial en muros perimetrales y losas ventiladas.



El conjunto de soluciones analizadas compuesto por cuatro patentes de invención y un modelo de utilidad bajo los marcos normativos de INAPI y WIPO constituyen una muestra del estado del arte en tecnología de envolventes, profundizando en la eficiencia higrotérmica y control de patologías.

A nivel macro, estas investigaciones resuelven de manera activa y pasiva tres problemáticas críticas de la edificación contemporánea:

La continuidad del aislamiento térmico y la erradicación de puentes térmicos en base a soluciones como el sistema TBBS (Patente N°3) o el modelo de utilidad basado en Steel frame con cintas de espuma elastómera (EPDM) demuestran una resolución técnica para eliminar las pérdidas energéticas en los encuentros nodales y perfiles estructurales.

El control de la condensación intersticial y superficial, tanto el panel multicapa perforado (Patente N°1) como las cámaras de aire controladas (Patente N°2 y Modelo N°1) abordan directamente la física de la edificación para mitigar el punto de rocío, previniendo la proliferación de agentes patógenos como lo son el moho y hongos, resguardando la integridad de los materiales.

La industrialización y modulación en base al uso de paneles monolíticos autoportantes (Patente N°4) e industrializados que evidencian una clara tendencia hacia la optimización en los tiempos de montaje, la hermeticidad mecánica entre componentes y la estandarización constructiva.

En su conjunto, estos documentos trazan una guía técnica para establecer que una arquitectura habitacional actual no puede dissociar el diseño espacial del diseño higrotérmico, siempre enfatizando en entregar soluciones técnicas para sus componentes junto a sus respectivos encuentros materiales.

Etapla II: Análisis de la Literatura Científica del Sistema Estructural.

Una vez delimitado el escenario industrial, esta fase profundiza en la base científica global del sistema estructural propuesto a utilizar. Se enfoca en la revisión de literatura indexada sobre el comportamiento físico, mecánico y térmico de las estructuras de pórticos y entramado pesado de madera, así como en el desempeño de sus envolventes constructivas. Esta etapa permite comprender como se ha desarrollado a lo largo del tiempo el control de fenómenos críticos para esta investigación, como lo son el fujo de temperaturas y puentes térmicos presentes en las envolventes utilizadas.

Esta sección sistematiza la revisión bibliográfica y el estado del conocimiento respecto al entramado pesado de madera. El análisis se estructura a partir de su evolución histórica, su caracterización mecánica, la física de sus uniones y su comportamiento higrotérmico ante agentes externos, validando su idoneidad como soporte de la envolvente arquitectónica a proponer.

1.- Evolución Histórica

La literatura científica documenta ampliamente que el entramado pesado constituye uno de los sistemas estructurales tradicionales con mayor arraigo en la arquitectura global. Desarrollado de manera simultánea en regiones con abundantes recursos forestales durante la Edad Media, sus máximos exponentes se localizan en Europa Central, en países como Alemania, Francia, Inglaterra y Noruega y en Asia Oriental principalmente en Japón.

Los estudios históricos coinciden en que la permanencia de estas edificaciones a lo largo de los siglos no es fortuita, sino el resultado de un conocimiento empírico avanzado en la selección del material y en la respuesta geométrica del esqueleto frente a las demandas climáticas y estructurales de sus respectivos entornos.

2. Caracterización Mecánica y Jerarquía Estructural

Desde la perspectiva de su mecánica estructural, el sistema se define por una alta capacidad portante fundamentada en el empleo de elementos de madera maciza de gran escuadría y sección transversal regular. La literatura técnica destaca las siguientes propiedades del modelo aporticado:

- Disposición Jerarquizada: El sistema opera bajo un orden claro de transmisión de cargas, donde las viguetas y correas secundarias transfieren las solicitaciones hacia las vigas principales, y estas a su vez a los postes verticales, logrando una conducción eficiente de las acciones gravitatorias directas hacia la cimentación.
- Optimización de Elementos: A diferencia de los sistemas de entramado ligero, este modelo concentra los esfuerzos en un número limitado de piezas estructurales robustas, lo que libera los planos verticales no portantes y optimiza la estabilidad global.

3. Física de las Uniones Carpinteras

El comportamiento del entramado pesado está supeditado a la eficiencia de sus nudos. La investigación científica contemporánea ha revalorizado las uniones carpinteras tradicionales por ensambles y empalmes, tales como la conocida caja y espiga, uniones a media madera, entalladuras, entre otras, demostrando que la fricción y el contacto de madera con madera garantiza una correcta continuidad mecánica.

Los modelos de análisis estructural indican que el objetivo crítico de estas uniones es limitar las deformaciones excesivas y controlar los mecanismos de fallo local en las zonas expuestas a altas concentraciones de flujo tensional. La literatura técnica subraya que los ensambles de madera permiten un grado de flexibilidad microestructural indispensable para la redistribución de esfuerzos internos sin llegar al colapso total.

Frente a solicitaciones dinámicas accidentales, como las acciones sísmicas o las presiones de viento, el análisis bibliográfico demuestra que el marco aporticado puro requiere de sistemas de rigidización complementarios. El entramado pesado resuelve este requerimiento mediante sistemas de arriostramiento diagonal, utilizando piezas denominadas jabalcones o tirantes. La correcta disposición geométrica de estos elementos triangula la estructura, controlando de manera rigurosa los desplazamientos laterales, previniendo el volcado o la distorsión angular del esqueleto estructural.

4. Comportamiento Higrotérmico

Uno de los campos con mayor respaldo científico es el comportamiento del material ante situaciones de incendio y agentes ambientales. Las investigaciones confirman que la madera maciza de gran sección posee un desempeño sobresaliente frente al fuego. Al ser expuesta a la llama directa, se desencadena un proceso de descarbonización superficial. Esta capa de carbón actúa como un escudo térmico natural con baja conductividad, ralentizando la velocidad de carbonización hacia el interior y manteniendo intacto el núcleo de la sección resistente por periodos prolongados.

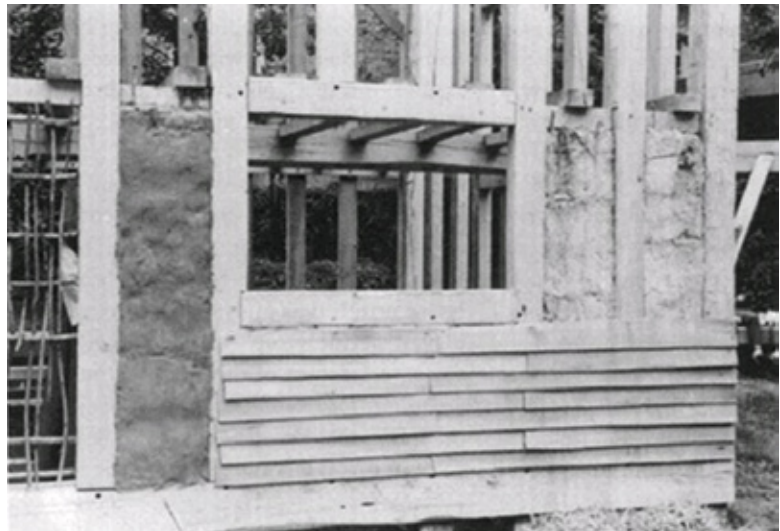
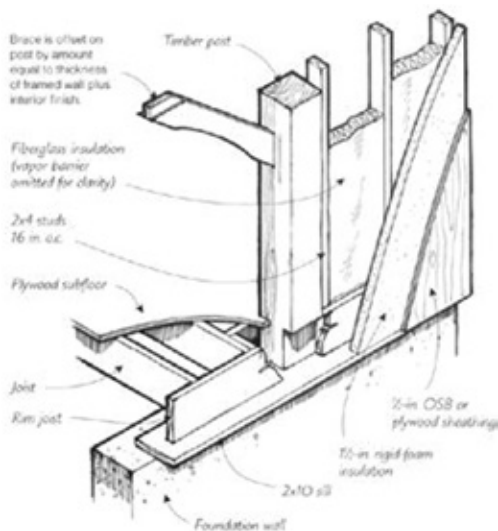
En relación con el aspecto higrotérmico la literatura condiciona la vida útil del sistema a una correcta selección de las especies maderables y al diseño de detalles constructivos que eviten la acumulación de humedad libre, previniendo la degradación biótica y asegurando un mantenimiento reducido a largo plazo. El análisis del ciclo de vida (ACV) posiciona a este sistema como un referente de la construcción ecológica, actuando como un sumidero de carbono activo, ofreciendo un bajo impacto ambiental en comparación con las estructuras de acero o hormigón armado.

El estudio evolutivo de los sistemas constructivos basados en el entramado pesado revela una transformación paradigmática en la relación entre la estructura portante y la envolvente del edificio. Históricamente, la arquitectura de madera pesada dependía de la integración simultánea de funciones en un solo plano vertical; los elementos estructurales como postes y vigas compartían el mismo espacio físico que los materiales de cerramiento.

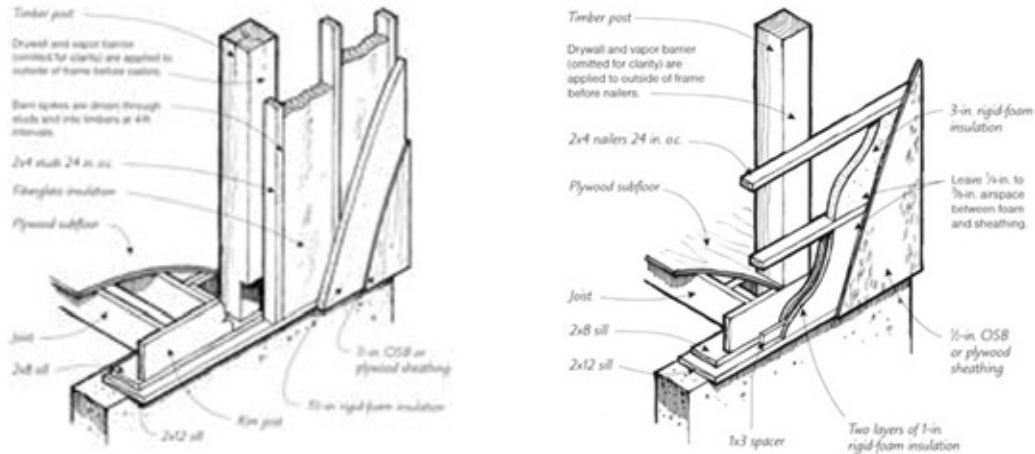
No obstante, las crecientes exigencias de habitabilidad, el desarrollo de nuevos materiales industrializados y la necesidad de optimizar el comportamiento global de las edificaciones impulsaron una transición hacia la disociación tectónica. Este proceso implicó desplazar la envolvente de manera progresiva hacia el exterior de la osamenta estructural, transformando al entramado pesado en un esqueleto protegido y exento de puentes térmicos geométricos directos.

A partir de la revisión de la literatura científica y técnica especializada del sistema tomando como referencia los análisis tipológicos de Ted Benson (1997) es posible sistematizar esta evolución cronológica y tecnológica en cuatro variantes de envolvente. Estas variantes describen de forma secuencial cómo las estructuras de grandes escuadrías han sido revestidas, modificando sustancialmente sus lógicas de montaje y expresivas. Las variantes se categorizan bajo los siguientes lineamientos científicos:

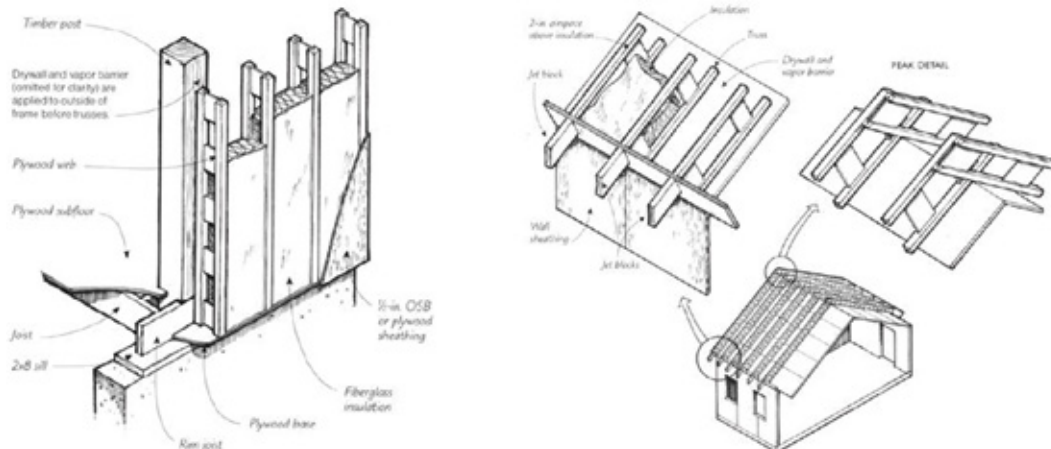
Variante 1: Sistema de relleno interpuesto entendido como la tipología tradicional e inicial, caracterizada por el confinamiento de masa en base a morteros, barro o mamposterías ligeras en los intersticios del entramado, manteniendo la madera expuesta en ambas caras.



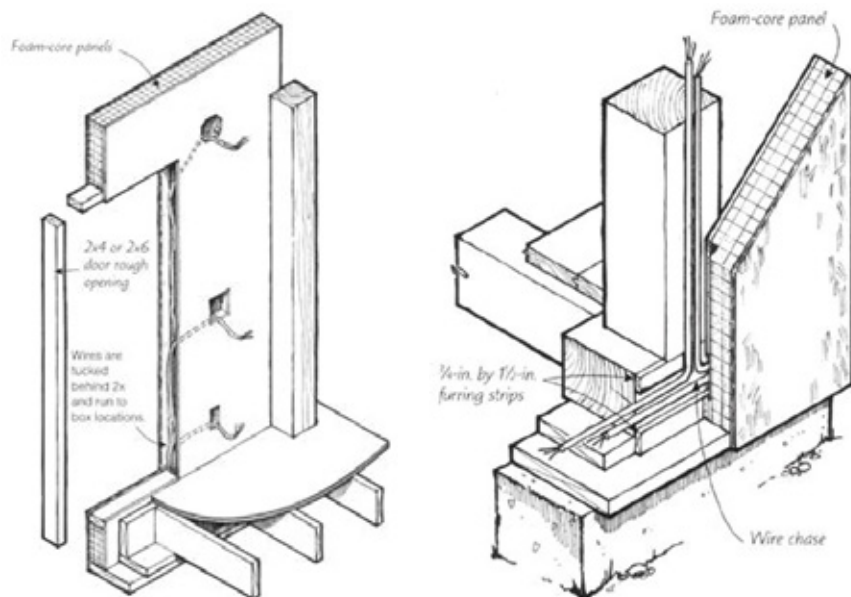
Variante 2: Envolvente adosada por el exterior mediante una subestructura ligera, esta representa el primer quiebre hacia la independencia del plano de cerramiento, empleando un entramado secundario fijado a la cara externa de la estructura principal. Estos pueden ubicarse de manera vertical u horizontal dentro del plano de cerramiento exterior.



Variante 3: Sistema de costillas o más bien llamado sistema de cerchas "Larsen", la cual presenta una evolución orientada a la minimización del contacto lineal de madera con madera a través de almas aligeradas, lo que permite generar grandes cámaras continuas destinadas exclusivamente al confinamiento de material aislante a gran escala. Esta variante ofrece una solución para contextos de mayores exigencias térmicas en torno a climas inhóspitos con zonas meteorológica poco acogedoras, extremas o carentes para establecer condiciones de confort ambiental.



Variante 4: Componentes prefabricados de “Paneles SIP”, esta variante plantea la consolidación de una envolvente autoportante, modular e industrializada que funciona de forma solidaria con el entramado pesado, optimizando la velocidad de montaje y la rigidez del conjunto. Sin dejar de lado el aspecto ya descrito de reducción de su capacidad aislante para el traslado de las instalaciones domiciliarias.



Metodología y Fundamentos Teóricos del Análisis Estructural

El desarrollo y análisis mecánico estructural del sistema constructivo de entramado pesado para esta investigación se ha fundamentado rigurosamente en la literatura científica y técnica especializada de la disciplina. Particularmente, los criterios de diseño, el comportamiento higrotérmico y la resolución de sus encuentros críticos se han estructurado bajo los postulados establecidos en la literatura de cuatro textos de Jack Sobon, así como también en las metodologías de diseño de encuentros y estandarización geométrica desarrolladas por William Beemer. A continuación, se presentan los textos involucrados:

- SOBON, Jack A y SCHROEDER, Roger. Construcción con estructura de madera, Todo sobre la construcción con postes y vigas. Vermont, EE. UU, Garden Way Publishing, 1984. 208 p.

-SOBON, Jack A. Construye una casa clásica con estructura de madera. Vermont, EE. UU, Storey Publishing, 1994. 208 p

-SOBON, Jack A. Carpintería histórica estadounidense: Una guía gráfica. 2a. ed. Massachusetts, EE. UU, Timber Framers Guild, 2004, 54 p.

-SOBON, Jack A. Tallado a mano: Las tradiciones, las herramientas y la belleza perdurable de las estructuras de madera. Massachusetts, EE. UU, Storey Publishing, 2019. 272 p

- BEEMER, Will y SOBON Jack A. Aprenda a construir estructuras de madera. Massachusetts, EE. UU, Storey Publishing LLC, 2016, 192 p

A través de este marco conceptual, se aborda la madera no como un material genérico o industrializado, sino como un elemento biológico dotado de anisotropía, cuyas propiedades mecánicas y cinéticas de contracción determinan directamente la viabilidad geométrica de la estructura. El análisis del comportamiento del entramado pesado se ha sistematizado a partir de los siguientes ejes técnico-científicos extraídos de la literatura de ambos autores:

Dimensionamiento basado en nudos y secciones críticas. Siguiendo la praxis de Sobon, el dimensionamiento de las secciones como los postes de 7x7 pulgadas no responde únicamente a la capacidad del elemento a compresión vertical, sino a la necesidad de albergar la caja y espiga sin comprometer la continuidad de las fibras longitudinales del componente. Sobon demuestra que el sobredimensionamiento aparente es, en realidad, una reserva estructural para mitigar la pérdida de sección en los encuentros.

Estandarización de ensambles y trazado de precisión. A partir de las metodologías de Beemer, se integra el sistema de trazado por caras de referencia, este método científico permite trabajar con maderas que presentan variaciones dimensionales o alabeos naturales, garantizando que los ejes de transferencia de carga en los nudos críticos se mantengan perfectamente ortogonales e invariables.

Comportamiento cinético y retracción. Se integran las ecuaciones de contracción tangencial, radial y longitudinal para predecir las deformaciones volumétricas durante el proceso de secado en obra, proceso descrito como “green lumber”. El uso de un hombro o despiece rebajado analizado por Sobon y Beemer, se aplica como un disipador de esfuerzos que previene el colapso por cizalle ante la contracción de la madera.

Rigidez mediante triangulación estructural. El análisis de la estabilidad lateral frente a las cargas dinámicas de viento y sismos se fundamenta evaluando la eficiencia de los ensambles con jabalcones o tornapuntas. Beemer enfatiza la optimización de los pasadores de madera cuyo comportamiento a flexión y corte asegura la elasticidad del nudo sin recurrir a conectores metálicos rígidos.

En torno a esta descripción la investigación de campo documentada por Sobon y Beemer demuestra que las estructuras basadas en el sistema de pórticos interconectados por “correas” o vigas maestras garantizan una estabilidad integral superior a largo plazo en comparación con los sistemas de entramados ligeros, siempre que se controlen las variables de encuentros y la correcta transferencia de cargas en los ensambles tradicionales.

Etapla III: Análisis de la Literatura Normativa Higrotérmica Chilena.

Finalmente, el diseño se transpone al contexto legal y territorial local. Esta última fase examina de manera rigurosa el marco regulatorio nacional, centrándose en las nuevas exigencias habitacionales introducidas mediante el Decreto Supremo No. 15, en vigor desde fines del año 2025, el cual redefine los estándares térmicos e higrotérmicos de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). Asimismo, se analizan las actuales zonificaciones climáticas del territorio chileno, asegurando que la envolvente responda con precisión matemática a los requerimientos específicos del lugar de emplazamiento.

1. Estructura jerárquica del marco regulatorio para edificaciones.

El diseño arquitectónico contemporáneo en Chile, particularmente en lo que respecta al acondicionamiento ambiental, se encuentra supeditado a un marco normativo e institucional de carácter jerárquico. Este entramado legal coordina las directrices de planificación urbana, las exigencias de habitabilidad y los estándares técnicos específicos para mitigar los riesgos derivados de un inadecuado comportamiento higrotérmico en la envolvente. Esta estructura se organiza en cuatro niveles de prelación legal:

Primer Nivel: Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC): Constituye el cuerpo legal matriz de rango legal que fija los principios, atribuciones, potestades y mecanismos de planificación territorial, desarrollo urbano y edificación a escala nacional.

Segundo Nivel: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC): Reglamento de ejecución de la LGUC que contiene las disposiciones específicas, los procedimientos administrativos y las exigencias de habitabilidad básicas. Es el núcleo donde se inscriben las directrices de comportamiento térmico e higrotérmico para las edificaciones.

Tercer Nivel: Normas Chilenas (NCh) y Reglamentos Específicos: Documentos técnicos desarrollados por el Instituto Nacional de Normalización (INN). Establecen los estándares de calidad, metodologías de cálculo, procedimientos para ensayos de laboratorio y parámetros de eficiencia por especialidad. Su obligatoriedad legal emana directamente de su citación explícita en el texto de la OGUC o mediante decretos supremos.

Cuarto Nivel: Instrumentos de Planificación Territorial (IPT): Instrumentos de escala macro y micro como el Plan Regulador Metropolitano (PRM) y el Plan Regulador Comunal (PRC) que ordenan las condiciones físicas de las comunas. Regulan las condiciones de zonificación, densidades y normas específicas de edificación a nivel local, debiendo subordinarse estrictamente a las exigencias generales de la ordenanza nacional.

2. Evolución Cronológica y Consolidación de la Reglamentación Térmica.

La internalización de criterios higrotérmicos y de eficiencia energética en la vivienda chilena ha seguido una trayectoria progresiva de exigencias obligatorias, transicionando desde un enfoque macro hacia una evaluación integrada del desempeño de la envolvente:

Primera Etapa (Año 2000): Primera incorporación en la OGUC de exigencias mínimas de transmitancia térmica (U) aplicadas exclusivamente al complejo de techumbres de las viviendas.

Segunda Etapa (Año 2007): Ampliación del espectro regulatorio de la envolvente opaca y translúcida, introduciendo límites de transmitancia térmica para muros perimetrales, pisos ventilados y una restricción porcentual básica de la superficie de ventanas.

Línea Base de Transición (2012-2018): Implementación conjunta entre el MINVU y el Ministerio de Energía de la Calificación Energética de Viviendas (CEV). Este instrumento operó inicialmente bajo un esquema de adhesión voluntaria para el mercado inmobiliario privado, sirviendo de laboratorio técnico para testear los estándares que el MINVU comenzó a exigir a partir de 2022 en sus programas de subsidio habitacional (DS.49 y DS.19) en las zonas centro-sur del país.

3. Decreto Supremo No. 15, 28/11/2025.

Hito contemporáneo relevante en la literatura normativa correspondiente a la publicación en el Diario Oficial, con fecha 27 de mayo de 2024 del Decreto Supremo No. 15 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, el cual introduce la actualización integral de la "Reglamentación Térmica" mediante la modificación del Artículo 4.1.10. y 4.1.10 Bis de la OGUC.

Este decreto entró en plena vigencia legal el 28 de noviembre de 2025. Coincidentemente, en virtud de la Ley de Eficiencia Energética (Ley N° 21.305), en octubre de 2025 la calificación energética de viviendas (CEV) adoptó un carácter obligatorio para todas las edificaciones residenciales nuevas del país.

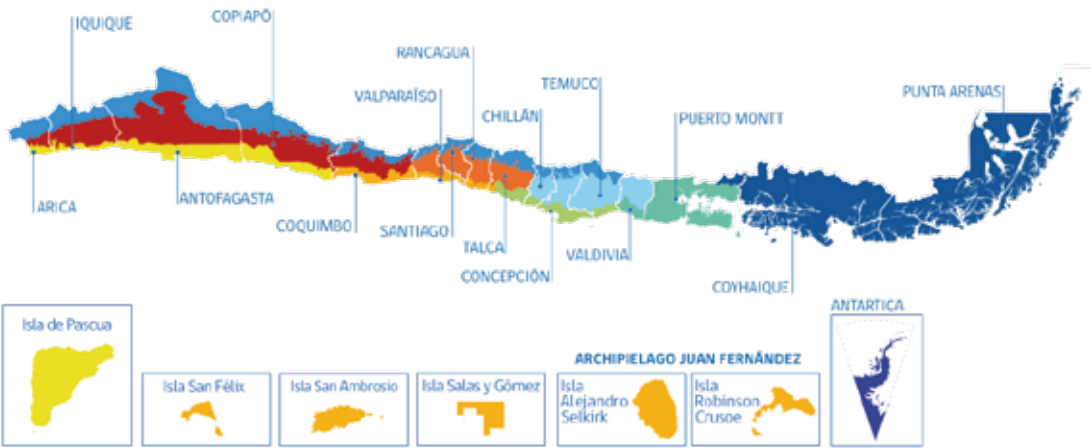
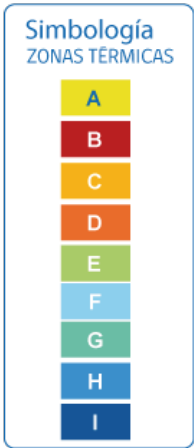
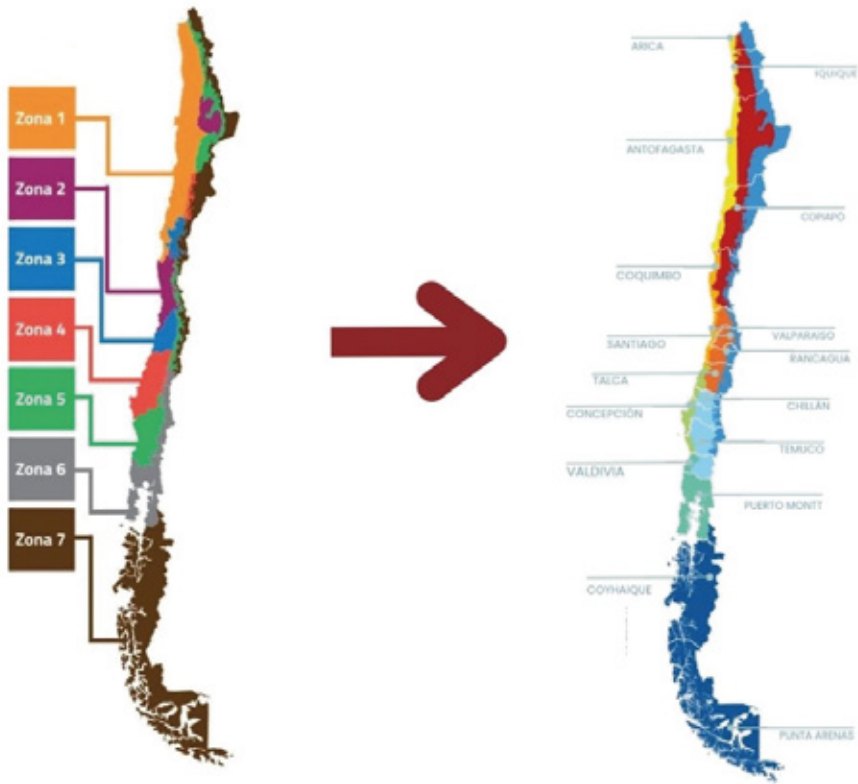
El DS No. 15 expande el campo de aplicación normativo, no solo eleva los estándares de la arquitectura residencial, sino que incorpora por primera vez exigencias vinculantes para establecimientos de salud y educación. Su objetivo científico es mitigar las patologías edilicias como la condensación superficial e intersticial, optimizar el confort higrotérmico interior y reducir la demanda de energía operativa para climatización. Esto último impacta directamente en la disminución de emisiones de Material Particulado (MP) en las comunas declaradas como zonas saturadas o latentes.

La nueva reglamentación térmica impone seis ejes de transformación técnica que modifican el flujo del diseño arquitectónico desde sus fases preliminares:

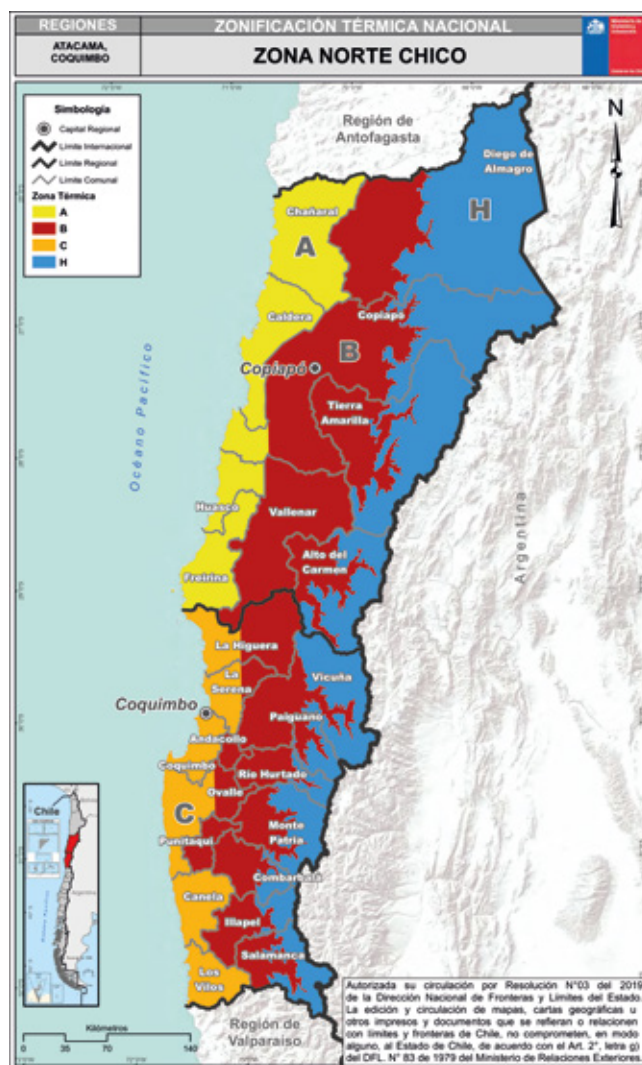
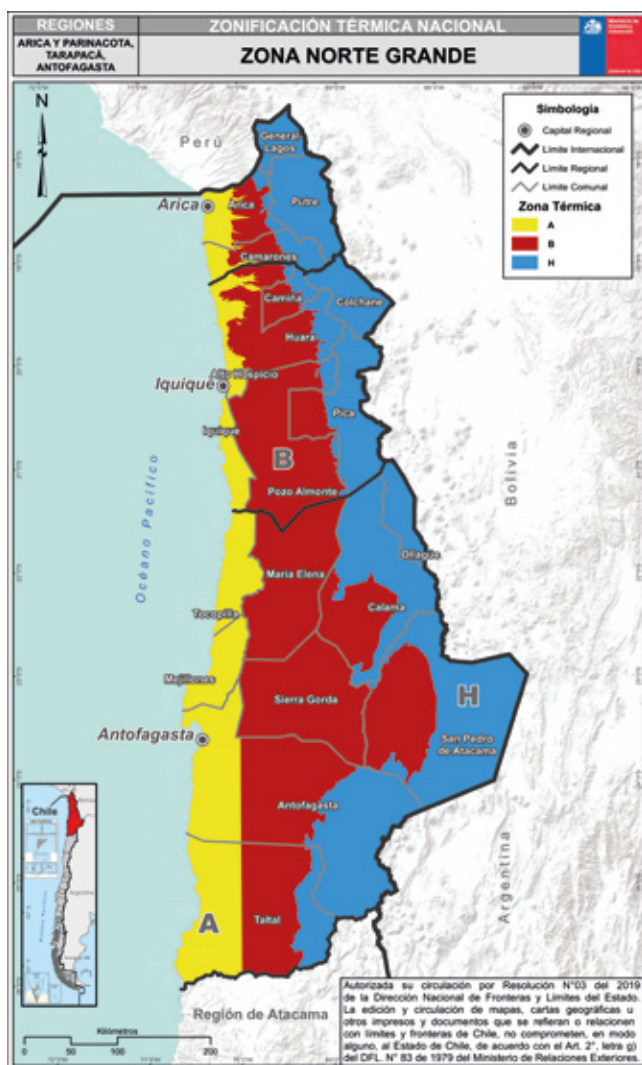
Eje 1. Reconfiguración Climático-Habitacional.

Se sustituyen las antiguas 7 zonas térmicas por 9 zonas climáticas desde la Letra A hasta la Letra I, fundamentada en la actualización de la NCh1079. Esta nueva zonificación reconoce con precisión variables de oscilación térmica diaria, radiación solar incidente, e influencias macro geográficas como la vaguada costera, los valles longitudinales y la altitud de la Cordillera de los Andes.

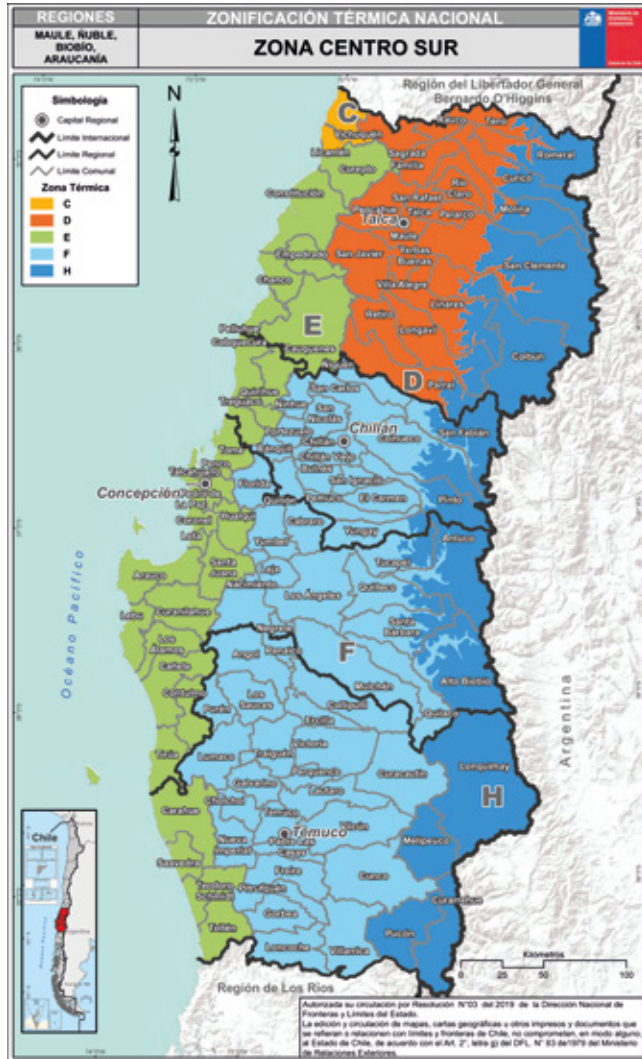
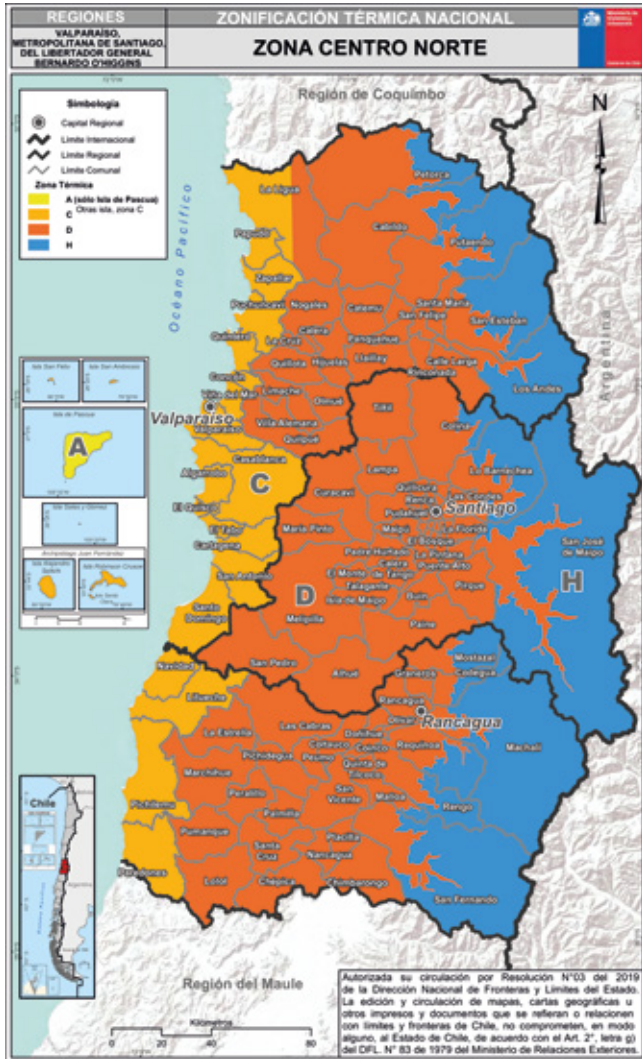
Modificación de Zonas Climáticas Habitacionales



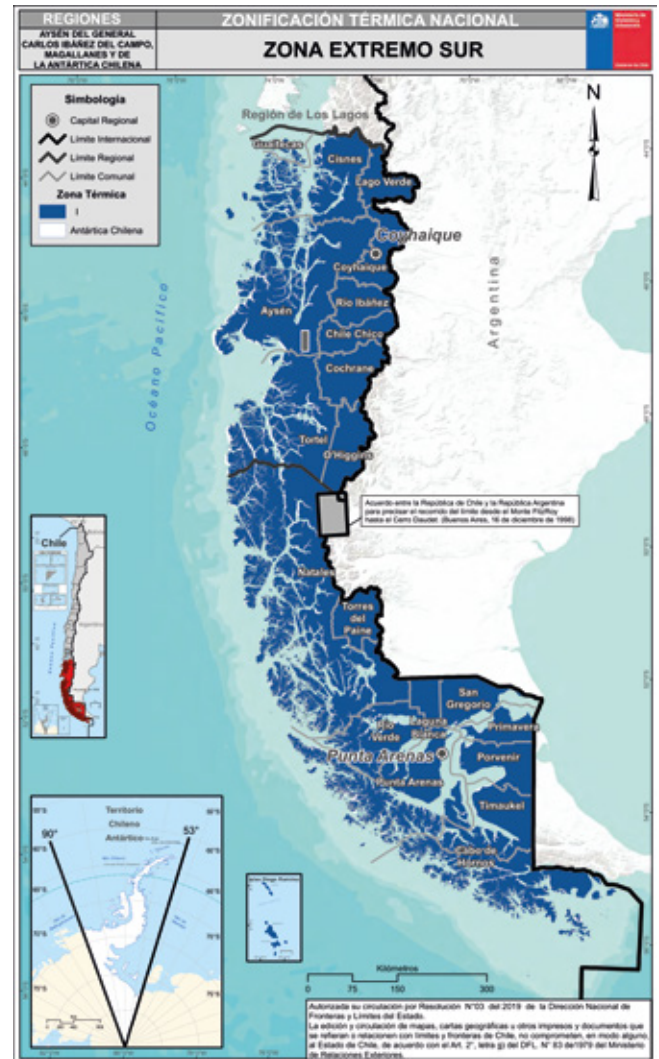
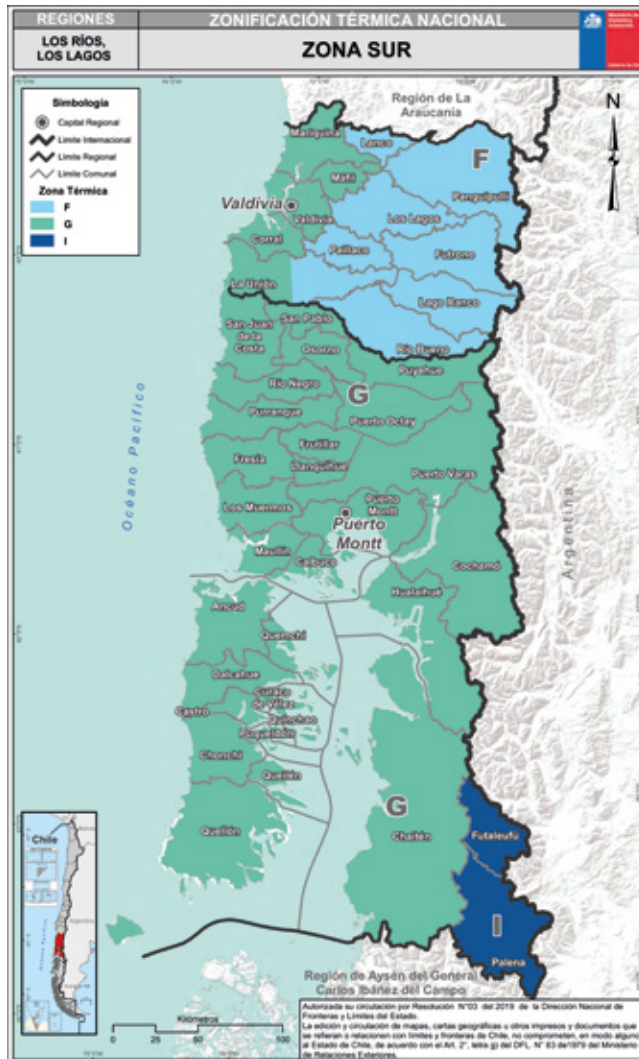
Distribución Geográfica Zona Norte



Distribución Geográfica Zona Centro



Distribución Geográfica Zona Sur



Eje 2. Incremento de Exigencias de Transmitancia Térmica (U).

Se produce una reducción drástica de los valores máximos permitidos de transmitancia térmica en techumbres, muros y pisos ventilados. La innovación crítica radica en la incorporación de límites para elementos antes desregulados: puertas, sobrecimientos y el marco de las ventanas. Para validar el cumplimiento, el proyectista dispone de cuatro vías metodológicas que vinculan de forma obligatoria las normas NCh853, NCh851, NCh2251, NCh3076, NCh3137 y NCh 3117.

Eje 3. Restricción Matricial del Porcentaje de Ventanas

El área máxima de acristalamiento ya no es un valor global fijo, ahora se calcula mediante una matriz que cruza la orientación geográfica del vano con el desempeño térmico del tipo de vidrio y marco, penalizando las orientaciones desfavorables ante la pérdida de calor hacia el sur y premian-do la captación solar pasiva controlada hacia el norte. El marco de verificación técnico se realiza bajo las directrices analíticas de las normas NCh3076 y NCh3137.

Eje 4. Obligatoriedad del Análisis del Riesgo de Condensación

En los complejos de techumbres, muros perimetrales y pisos ventilados se vuelve mandatorio verificar la ausencia de patologías higrotérmicas bajo el procedimiento de cálculo de la NCh1973. El diseño debe disipar puentes térmicos y permitir que el vapor de agua que ingrese al respectivo complejo pueda salir libremente al ambiente exterior.

Eje 5. Hermeticidad y Control de Infiltraciones de Aire

Se fijan tasas de renovación de aire máximas permitidas a presiones diferenciales, tabuladas de acuerdo con la provincia de emplazamiento del proyecto. Asimismo, los componentes de la envolvente translúcida y accesos deben certificar mediante ensayos de laboratorio una clase mínima de permeabilidad al aire.

Eje 6. Mecanismos de Ventilación Conectados

Para balancear la alta hermeticidad de la envolvente y asegurar la calidad del aire interior, se vuelve mandatorio el diseño de sistemas de ventilación mecánicos, naturales o híbridos que garanticen las tasas de renovación mínimas calculadas bajo los criterios de las normas NCh3308 y NCh3309.

4. Fundamentos Fenomenológicos: Psicrometría y Origen de Condensaciones.

Para dar cumplimiento estricto al punto 4 del Artículo 4.1.10 de la OGUC relacionado con la NCh1973, es imperativo abordar la psicrometría, ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo y el efecto de la humedad sobre los materiales y el confort humano.

El vapor de agua contenido en el aire de los edificios experimenta cambios de estado físicos que gatillan patologías constructivas. La condensación ocurre bajo dos fenómenos termodinámicos:

- Por incremento de vapor: Aumento de la presión de vapor interior a temperatura constante, lo que eleva la Humedad Relativa (HR) hasta alcanzar la Presión de Vapor de Saturación, equivalente al 100% de HR.
- Por descenso de temperatura: Reducción de la temperatura del aire sin variación del contenido absoluto de vapor, elevando la HR hasta interceptar la Temperatura de Rocío.

La condensación superficial ocurre en la cara interna expuesta de los cerramientos. Su aparición depende de la cantidad de vapor ambiental y de la Temperatura Superficial Interior.

Si la Resistencia Térmica de un muro es deficiente, la pérdida de calor hacia el exterior será elevada, provocando que la temperatura superficial interior caiga por debajo de la temperatura de rocío. Las zonas más propensas a este fenómeno crítico son aquellas donde la circulación convectiva del aire se ve restringida como aristas, encuentros de rincón, esquinas de techumbre o detrás de mobiliario fijo, sumado a los puntos de discontinuidad material conocidos como puentes térmicos. La prevención pasiva exige incrementar el aislamiento térmico para elevar la temperatura superficial interior sobre el límite crítico.

Durante el periodo invernal, la baja temperatura exterior reduce la humedad absoluta del aire libre, generando un desequilibrio donde la presión de vapor interior es significativamente mayor que la exterior. Este gradiente de presiones impulsa un fenómeno de difusión de vapor de agua a través de

las capas materiales del cerramiento, moviéndose desde el plano caliente (interior) hacia el plano frío (exterior). A medida que el vapor atraviesa los componentes del muro, se encuentra con un gradiente de temperaturas decreciente. Si en algún punto del interior de la sección constructiva la presión de vapor de diseño alcanza o supera la Presión de Vapor de Saturación debido a que la temperatura local es inferior a la Temperatura de rocío, el vapor cambia a fase líquida, consolidando la condensación intersticial.

5. Rol de los Materiales Aislantes y su Influencia Higrotérmica.

La resolución tectónica del cerramiento frente a los riesgos psicométricos depende directamente de la selección, ordenamiento y propiedades físicas de los materiales aislantes. Desde la física de la construcción, el aislamiento reduce y regula la transferencia de calor mediante la minimización de la conductividad térmica efectiva, inmovilizando aire en microestructuras porosas, fibrosas o celulares.

La disposición de las capas en el cerramiento altera drásticamente el comportamiento higrotérmico. Al colocar el aislante lo más cerca posible de la cara exterior, el material "absorbe" el gradiente térmico, manteniendo la estructura portante interior a una temperatura elevada y estable. Esto reduce las presiones de vapor internas en los puntos fríos, eliminando simultáneamente los puentes térmicos y alejando el riesgo de condensación intersticial. Si razones constructivas obligan a situar el aislante en la cara interna, su cara exterior que estará fría caerá a temperaturas cercanas a la exterior. El aislante detiene el calor, pero si el vapor de agua penetra libremente, alcanzará la zona fría saturándose instantáneamente. Este fenómeno se conoce como riesgo por humectación, esto ocurre cuando los poros o fibras de un aislante se saturan de agua líquida, el aire estanco es sustituido por un fluido cuya conductividad térmica es mayor que la del aire y aun mayor si el agua llega a congelarse, anulando la resistencia térmica del cerramiento y acelerando el colapso material.

Para contrarrestar este fenómeno, se vuelve imprescindible el uso de una barrera de vapor instalada estrictamente en la cara caliente del aislante, dotada de una alta resistencia a la difusión del vapor, o en su defecto, la especificación de aislantes con un elevado factor de resistencia a la difusión de vapor de agua, como el Poliestireno Extruido (XPS).

6. Clasificación de Materiales Aislantes en el Mercado Nacional.

Para la elección de las soluciones constructivas que satisfagan los requerimientos del proyecto en base a su origen, microestructura y comportamiento físico, se establece la siguiente sistematización:

A. Materiales Aislantes de Origen Mineral

- Lanas Minerales: Lana de Roca y Lana de Vidrio
- Aislantes Minerales Granulares: Perlita Expandida, Vermiculita Expandida y Vidrio Celular.

B. Materiales Aislantes de Origen Sintético: Presentan altas prestaciones de resistencia térmica y, en casos específicos, actúan como barreras eficientes ante el paso del agua y el vapor:

- Poliestireno Expandido (EPS)
- Poliestireno Extruido (XPS)
- Poliuretano (PUR)
- Poliisocianurato (PIR)
- Espumas Fenólicas

C. Materiales Aislantes de Origen Orgánico y Bio-Basado: Materiales de baja energía incorporada y alta capacidad de amortiguación y desfase térmico dinámico gracias a su alta capacidad calorífica específica.

- Fibras Vegetales: Fibra de Madera (ej. AISLACOR), Fibra de Celulosa, Fibra de Cáñamo, Fibra de Lino, Fibra de Algodón, Fibra de Coco, Fibra de Kenaf y Yute.
- Fibras Animales: Lana de Oveja.

D. Materiales Aislantes de Altas Prestaciones

- Aerogeles
- Materiales de Cambio de Fase (PCM)

Para el desarrollo de la presente investigación, el Decreto Supremo No. 15 y los fundamentos psicrométricos expuestos no se adoptan meramente como una lista de verificación de cumplimiento administrativo, sino como la regla matriz de diseño. La exigencia concurrente de la NCh1973 y las propiedades físico-mecánicas de los aislantes catalogados obligan a que el diseño del detalle constructivo de la envolvente controle simultáneamente el flujo de calor y la presión de vapor. De este modo, la física de la construcción se convierte en un input generativo de la forma, la materialidad y la tecnología del proyecto de investigación.

FASE 2: DESARROLLO DE UNA ENVOLVENTE CONSTRUCTIVA MODULAR

La presente fase aborda la transición desde el marco teórico y normativo hacia la materialización arquitectónica del proyecto de investigación, mediante el diseño de un sistema de envolvente constructiva modular y autoportante. El objetivo central es configurar una solución técnica constructiva que se vincule de manera sinérgica a la lógica constructiva del entramado pesado y a su vez que satisfaga las exigencias térmicas e higrotérmicas de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC).

Para ello, el desarrollo se articula en tres dimensiones interdependientes: en primer lugar, el diseño geométrico y estructural del panel autoportante, optimizando su modulación para estandarizar sus variantes y facilitar el montaje; en segundo lugar, la definición de la estratigrafía constructiva y material específica para los complejos exigidos en la nueva reglamentación, calculada específicamente para garantizar la continuidad del aislamiento, el control de la difusión de vapor y la mitigación de puentes térmicos, entre otras solicitudes, y finalmente, el diseño de los nodos de vinculación estructural entre el sistema constructivo de entramado pesado y los paneles autoportantes.

2.1. Diseño de Paneles Autoportantes

2.1.1. Motivación.

La motivación principal de este proyecto de investigación y desarrollo radica en las limitaciones críticas que presentan las edificaciones residenciales frente al comportamiento higrotérmico, específicamente en lo que respecta al riesgo de condensaciones superficiales e intersticiales. Actualmente, el sistema de entramado ligero tanto en madera como en metal es una tipología constructiva implícitamente referenciada y regulada en la normativa térmica chilena; sin embargo, su configuración estructural intrínseca caracterizada por una alta densidad de montantes verticales integrados en el plano del cerramiento complejiza la continuidad del aislamiento térmico. Esta discontinuidad material propicia la aparición de puentes térmicos y zonas vulnerables a las infiltraciones de aire y humedad, lo que eleva el riesgo de fallas higrotérmicas y patologías constructivas que degraden la vida útil de las estructuras internas de estos planos de cerramiento y por consecuencia la habitabilidad de la vivienda.

2.1.2. Oportunidad.

Frente a este escenario, surge una oportunidad de innovación al reconfigurar la propuesta envolvente del sistema constructivo de entramado pesado de madera. A diferencia del entramado ligero, los entramados pesados resuelven el comportamiento y las solicitaciones estructurales de la edificación mediante pórticos y vigas dispuestos en sus propios ejes, concentrando los esfuerzos mecánicos en elementos de gran sección. Esta lógica de diseño libera a la envolvente perimetral de las exigencias portantes de carga gravitacional vertical, transformándola en un plano libre de cerramiento.

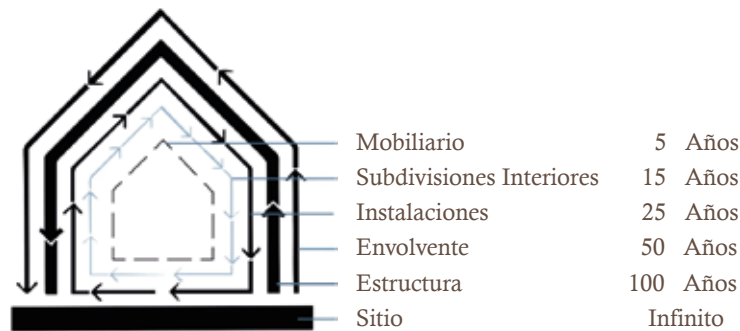
Esta condición geométrica y estructural entrega la oportunidad de proyectar una envolvente modular autoportante exterior que sea perimetralmente continua. Al posicionarse por fuera de la macroestructura de los pórticos, es posible diseñar una estratigrafía material optimizada que responda eficientemente al comportamiento higrotérmico, eliminando los puentes térmicos estructurales, el riesgo de condensaciones superficiales e intersticiales y controlando las infiltraciones mediante juntas herméticas estandarizadas.

2.1.3. Instancia de Diseño.

La instancia de diseño se fundamenta teóricamente en la "Teoría de los Soportes" formulada por el arquitecto Nicholas John Habraken en su libro *Soportes: Una alternativa a la vivienda masiva* de 1961, el cual plantea la separación entre el soporte entendido como la estructura y las unidades separables entendidas como zonas; complementada científicamente por el concepto de las "Capas de Cambio" postuladas por Stewart Brand en su libro *Cómo aprenden los edificios* de 1994. Ambas teorías convergen al reconocer que una edificación no es un objeto estático y monolítico, sino un sistema dinámico compuesto por múltiples subsistemas constructivos que poseen ciclos de vida útil, duraciones y tasas de obsolescencia temporal marcadamente diferenciadas.

Bajo este enfoque de Brand, la vivienda se descompone cronológica y materialmente en capas independientes: el sitio o terreno posee una permanencia perenne; la estructura en este caso de entramado pesado de madera actúa como el soporte invariable con una vida útil proyectada superior a 100

años; mientras que la envolvente, sus instalaciones domiciliarias y subdivisiones interiores presentan ciclos de renovación y desgaste mucho más acelerados.



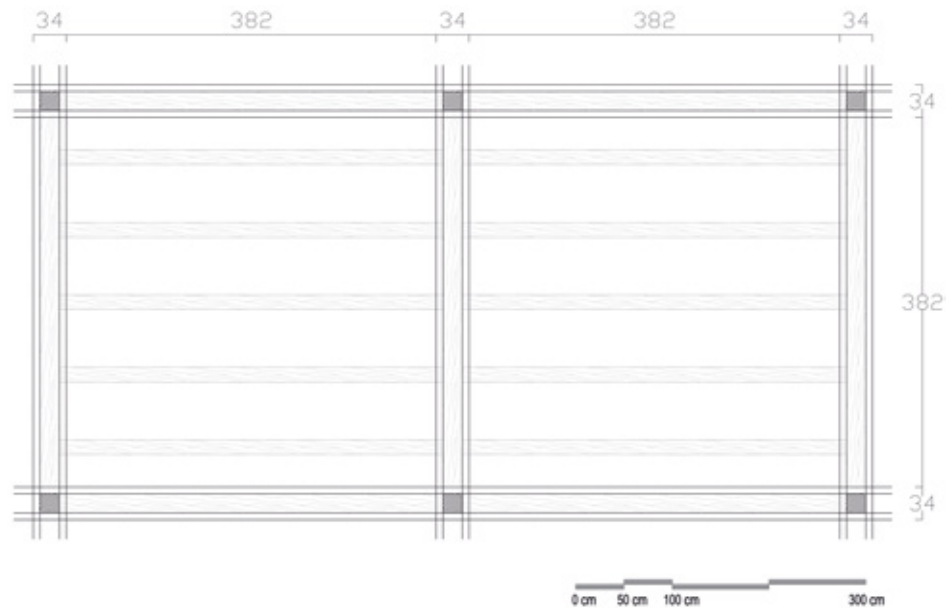
En torno al postulado de Habraken para que la separación entre el soporte y las unidades separables funcione sin generar caos técnico, se requiere una herramienta de coordinación modular descrita a continuación como la Malla Tartán. Inspirada en el tejido escocés del mismo nombre, consiste en una cuadrícula de diseño bidimensional caracterizada por la alternancia de bandas anchas y bandas estrechas, la cual actúa como el dispositivo de mediación que segrega materialmente las funciones y espacios dentro del plano de diseño en tres niveles estrictamente diferenciados de acuerdo con las especificaciones de la investigación:

Nivel 1: Patrón Dimensional de los Soportes o más bien la Estructura de entramado pesado de madera insertas en bandas Estrechas destinadas exclusivamente al posicionamiento de los pórticos y vigas que componen el esqueleto de entramado. Al aislar geométricamente este soporte de largo plazo, se garantiza su estabilidad e inmunidad frente a las modificaciones de las capas adyacentes.

Nivel 2: Modulación de Componentes planteados como márgenes técnicos insertos en bandas estrechas dispuestas de manera simétrica a ambos costados del patrón estructural. Para este proyecto estos espacios adyacentes están reservados estrictamente para desarrollar las subdivisiones interiores e instalaciones domiciliarias, capas y elementos materiales de menor duración en relación con la estructura principal.

Nivel 3: Unidades Separables planteadas como las zonas habitables, insertas en bandas anchas correspondientes a los módulos espaciales de mayor dimensión. Estas franjas constituyen las zonas útiles e interiores netas de la vivienda, libres de componentes estructurales. Son los espacios libres destinados a albergar las funciones habitables principales como salas, dormitorios, cocinas, entre otras.

La propuesta plantea un sistema de ordenamiento espacial basado en la grilla tartán, independizando las áreas habitables de las bandas para la estructura y sus componentes adyacentes, definiendo módulos con una luz libre interior de 382 cm de espesor interconectados por franjas menores de 34 cm de espesor total; estas bandas secundarias se subdividen horizontal y verticalmente en un núcleo central de 20 cm destinado a la concentración del sistema de pórticos estructurales y dos franjas adyacentes simétricas de 7 cm a cada lado, concebidas estratégicamente para absorber el paso de instalaciones, las holguras constructivas y subdivisiones interiores sin interferir en la sección portante.



2.1.4. Caso de uso.

Con el propósito de evaluar la viabilidad técnica de la investigación, esta adopta como caso de estudio y prototipo de validación una tipología residencial de dos niveles resuelta mediante un sistema de entramado pesado de madera. Esta estructura se compone de tres pórticos principales secuenciados que configuran un esqueleto portante tridimensional. El sistema se articula a partir de componentes de grandes escuadrías perfectamente modulados y coordinados, entre los que destacan:

Componentes Verticales: Postes o pilares de 200 x 200 mm que transmiten las cargas directamente hacia las fundaciones.

Componentes Horizontales: Soleras inferiores, Vigas correa y Tirantes de 200 x 200 mm; Vigas de piso de 150 x 180 mm; que consolidan la rigidez del conjunto y estructuran tanto los pórticos como el entrepiso.

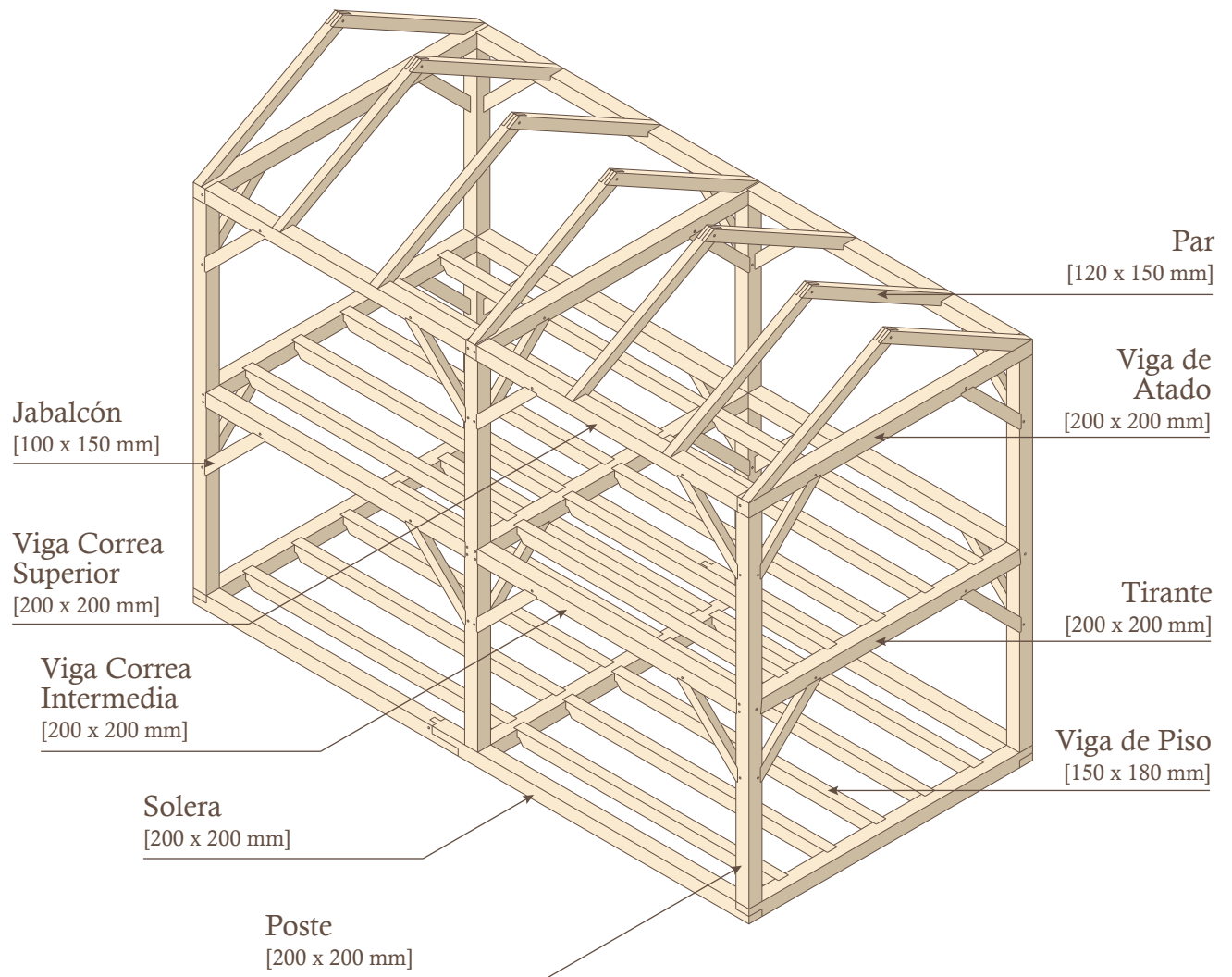
Componente de Techumbre: Compuesto por pares de 120 x 150 mm entendidas como vigas inclinadas que determinan la pendiente del techo.

Componente de Arriostramiento: Jabalcones inclinados como riostras de 100 x 150 mm, ubicados en los encuentros entre postes y vigas. Encargados de estabilizar la estructura ante esfuerzos laterales y garantizar la indeformabilidad en ambas direcciones estructurales.

Clavijas: Pasadores cilíndricos de 25 mm de diámetro, que cumplen la función de tarugos estructurales asegurando la transferencia de esfuerzos entre piezas y garantizando la integridad mecánica de sus uniones y encuentros.

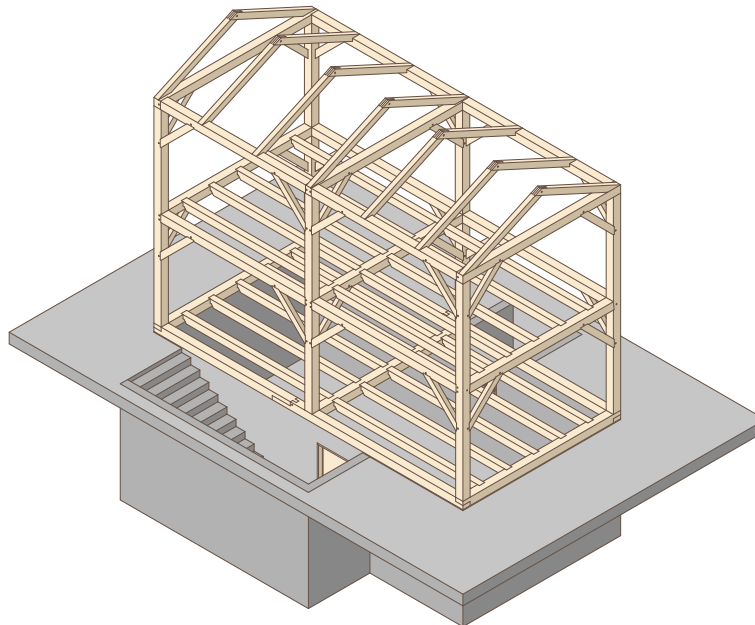
Este modelo matriz no solo actúa como el soporte estructural del proyecto, sino que constituye la base geométrica sobre la cual se desarrollan los paneles de la envolvente, asegurando la continuidad del aislamiento perimetralmente.

Componentes del Caso de Uso

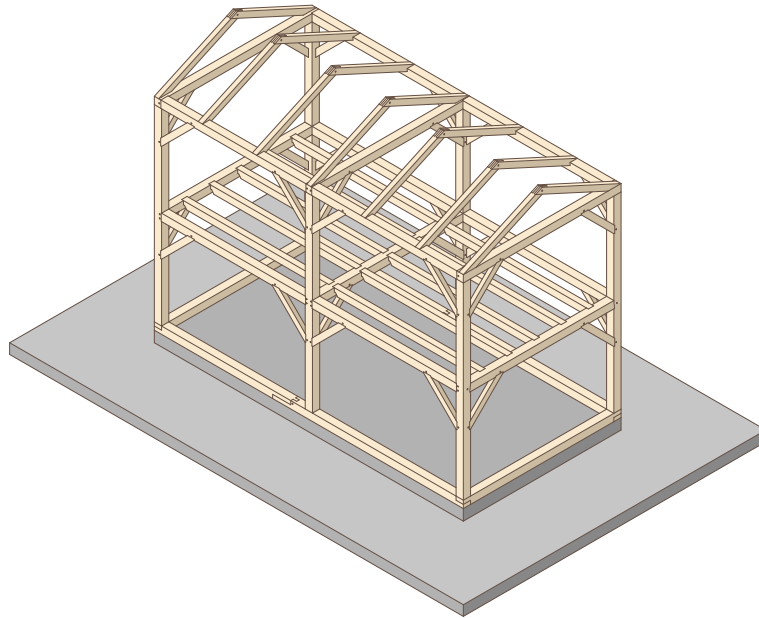


2.1.5. Variantes de Cimentación.

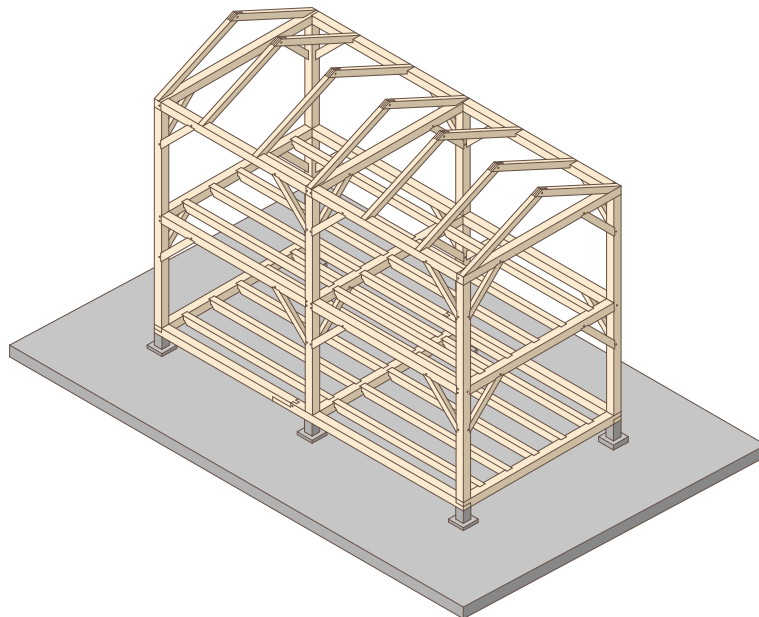
El planteo de tres variantes de cimentación tiene como propósito fundamental identificar las oportunidades operacionales y modificaciones que experimenta el sistema de entramado pesado de madera al interactuar con distintas infraestructuras de soporte. Si bien el sistema mantiene inalterable su lógica matriz de postes y soleras para la conducción de cargas, la interfaz con cada fundación altera la configuración de sus componentes horizontales; así, mientras la variante de cimentación profunda mediante una losa de fundación con muros pantalla apoya perimetralmente la estructura, la variante aislada mediante dados de hormigón exige una correcta disposición de esfuerzos en sus empalmes inferiores y la variante superficial continua mediante un radier de hormigón armado permite suprimir por completo sus vigas de piso de primer nivel asumiendo el hormigón la función de plataforma horizontal, optimizando la cuantía de madera sin desvirtuar la naturaleza estructural del entramado pesado bajo la lógica de pórticos.



Variante 1: Cimentación Profunda.



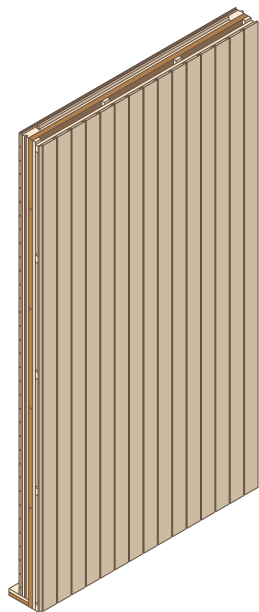
Variante 2: Cimentación Superficial Continua.



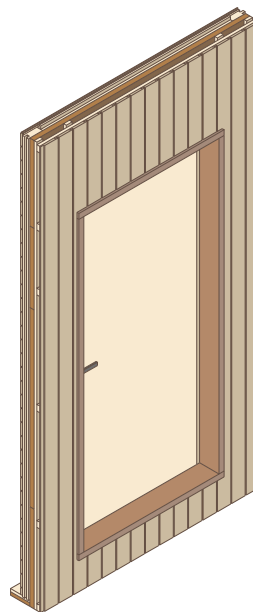
Variante 3: Cimentación Superficial Aislada.

2.1.6. Paneles Autoportantes.

La envolvente del proyecto se define mediante un sistema de paneles autoportantes modulares desarrollado a partir de un panel base, cuyas dimensiones estándar rigen la totalidad de los cerramientos bajo una lógica de encuentros normalizados y estandarizados en sus caras laterales y superiores. Esta matriz geométrica y constructiva asegura una estricta homogeneidad entre el panel base y los complejos de ventanas y puertas opacas, unificando las uniones verticales y horizontales de todo el sistema, estableciendo la misma lógica constructiva para el complejo de techumbre. Para el caso específico de los vanos mediante módulos de ventanas y puertas opacas, el diseño se estructura en torno a la adopción de soluciones constructivas indexadas en el listado oficial de soluciones constructivas establecido por el Minvu, proporcionando una base técnica estandarizada que valida tanto los ensambles en obra como las memorias de cálculo de comportamiento higrotérmico y eficiencia térmica del conjunto global.

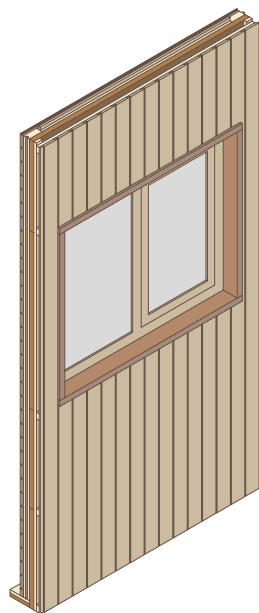


Panel Base

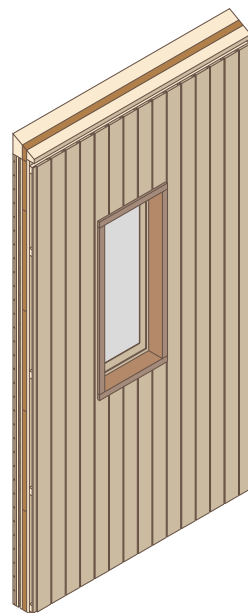


Panel de Puerta Opaca

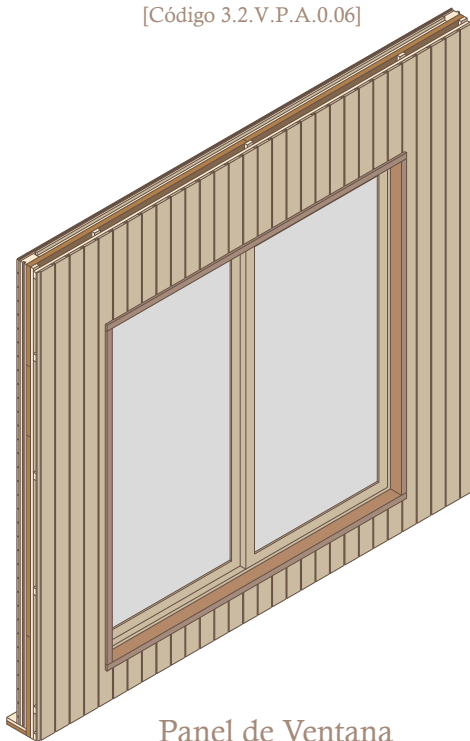
[Código 3.1.P.M.0.02]



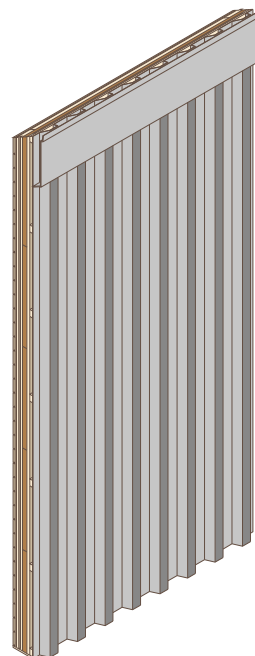
Panel de Ventana
[Código 3.2.V.P.A.0.06]



Panel de Ventana
[Código 3.2.V.P.P.3.01]



Panel de Ventana
[Código 3.2.V.A.C.1.05]



Panel de Techumbre

2.2. Diseño de Estratigrafías Constructivas Específicas.

2.2.1. Estratigrafía Muros Perimetrales.

1. Revestimiento Interior

MSD Arauco - Machihembrado $\frac{3}{4}$ " x 4" [14 mm]

2. Barrera Vapor

Lamina Volcán Wrap. Papel Kraft laminado con polietileno. [0,123 mm]

3. Tablero OSB [9,5 mm]

4. Pino Certificado Seco Cepillado 2x4" [41x90 mm]

5. Panel Aislante Aislacor

Fibras Naturales Corteza Eucalipto [41-30 mm]

6. Barrera Hidrofuga

Membrana Hidrofuga TYPRO M80 [0,15 mm]

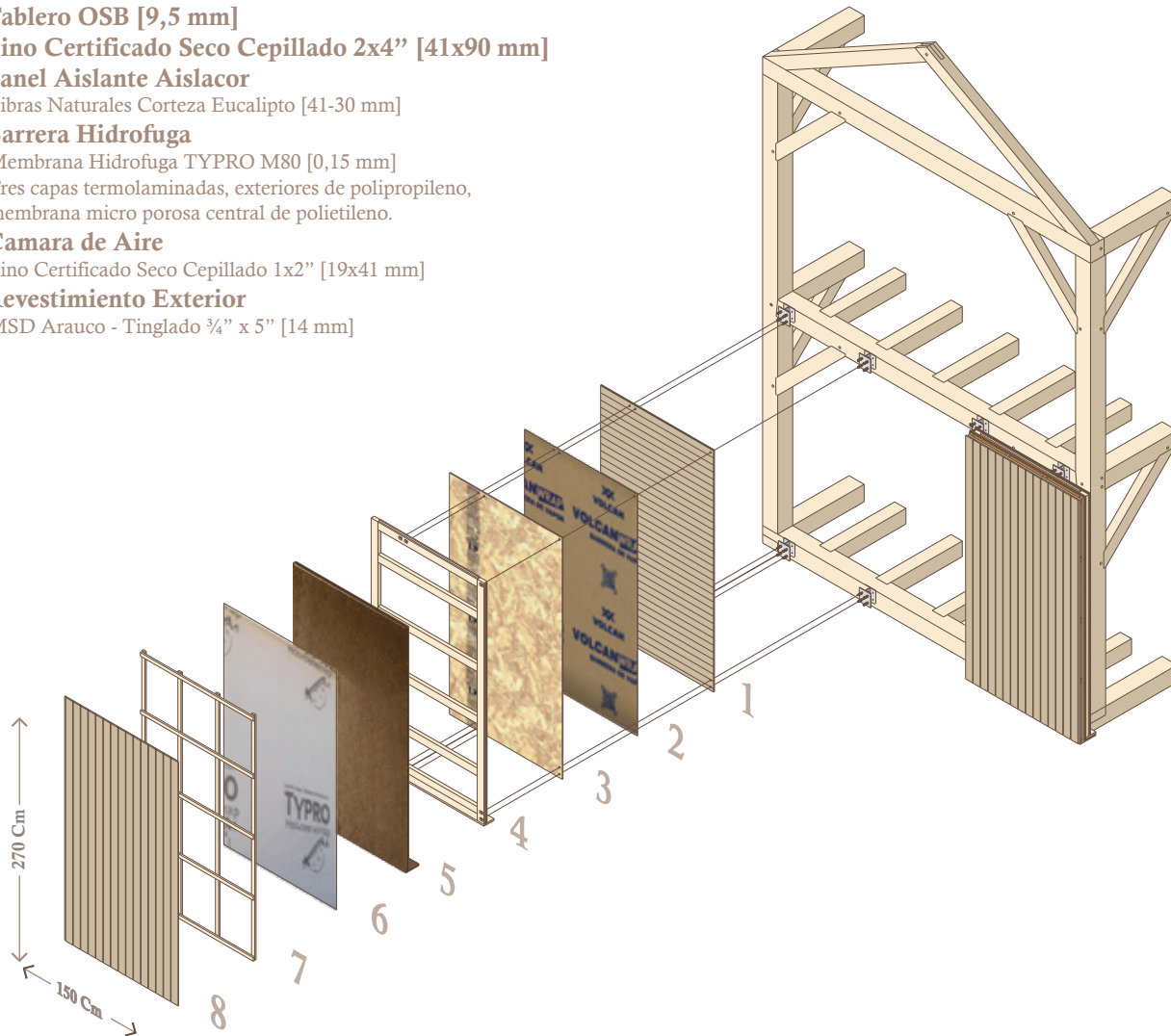
Tres capas termolaminadas, exteriores de polipropileno, membrana micro porosa central de polietileno.

7. Camara de Aire

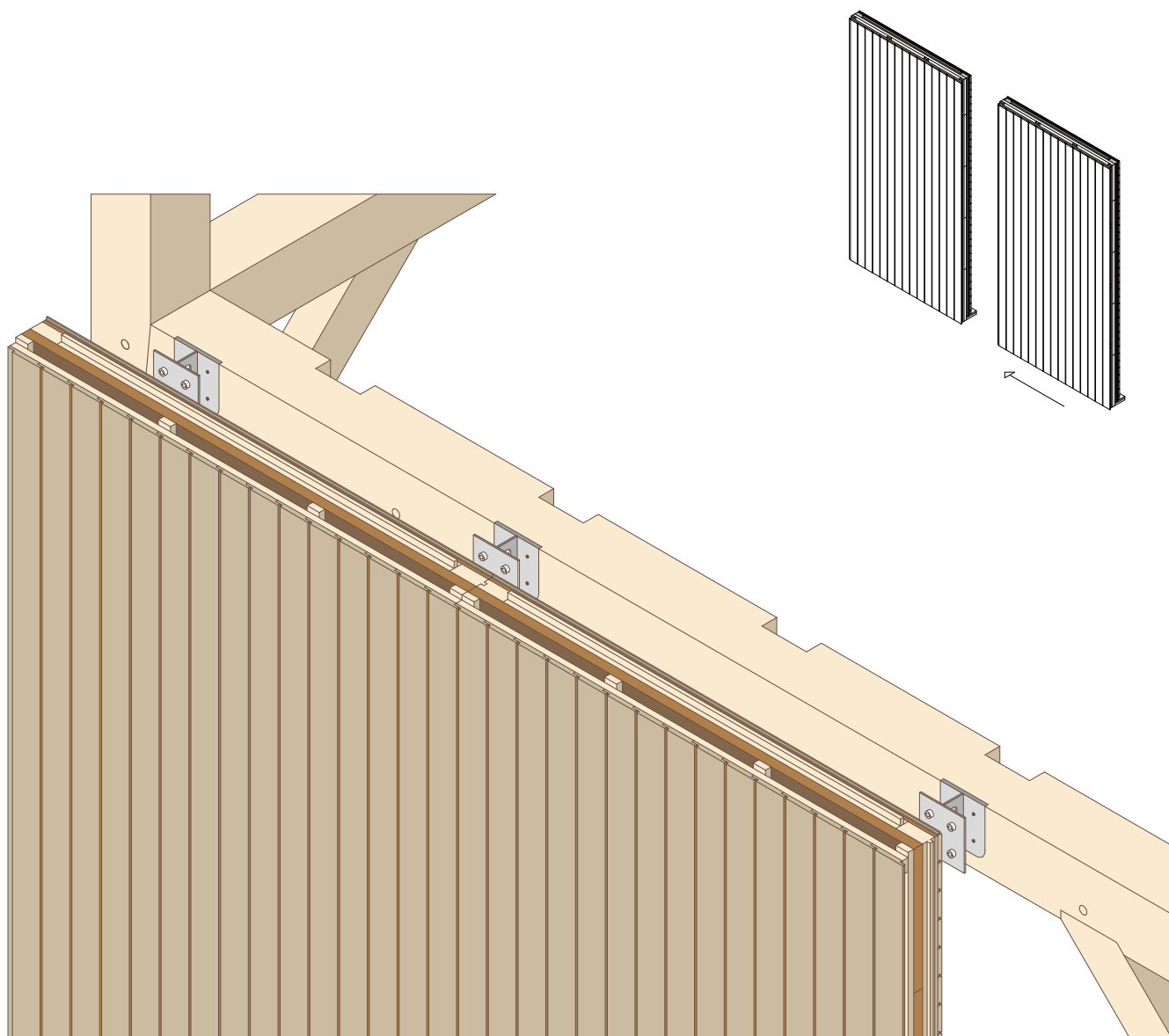
Pino Certificado Seco Cepillado 1x2" [19x41 mm]

8. Revestimiento Exterior

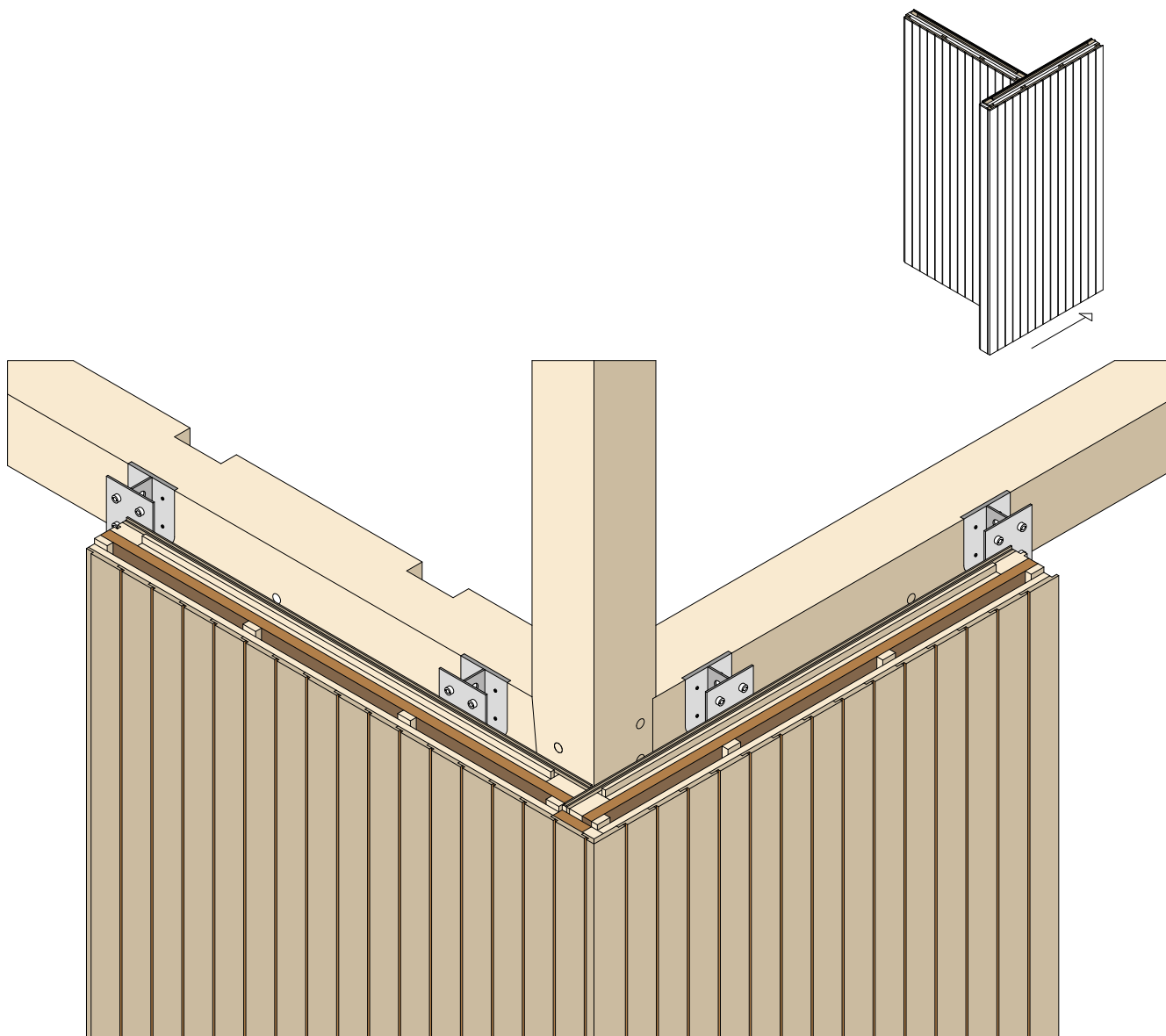
MSD Arauco - Tinglado $\frac{3}{4}$ " x 5" [14 mm]



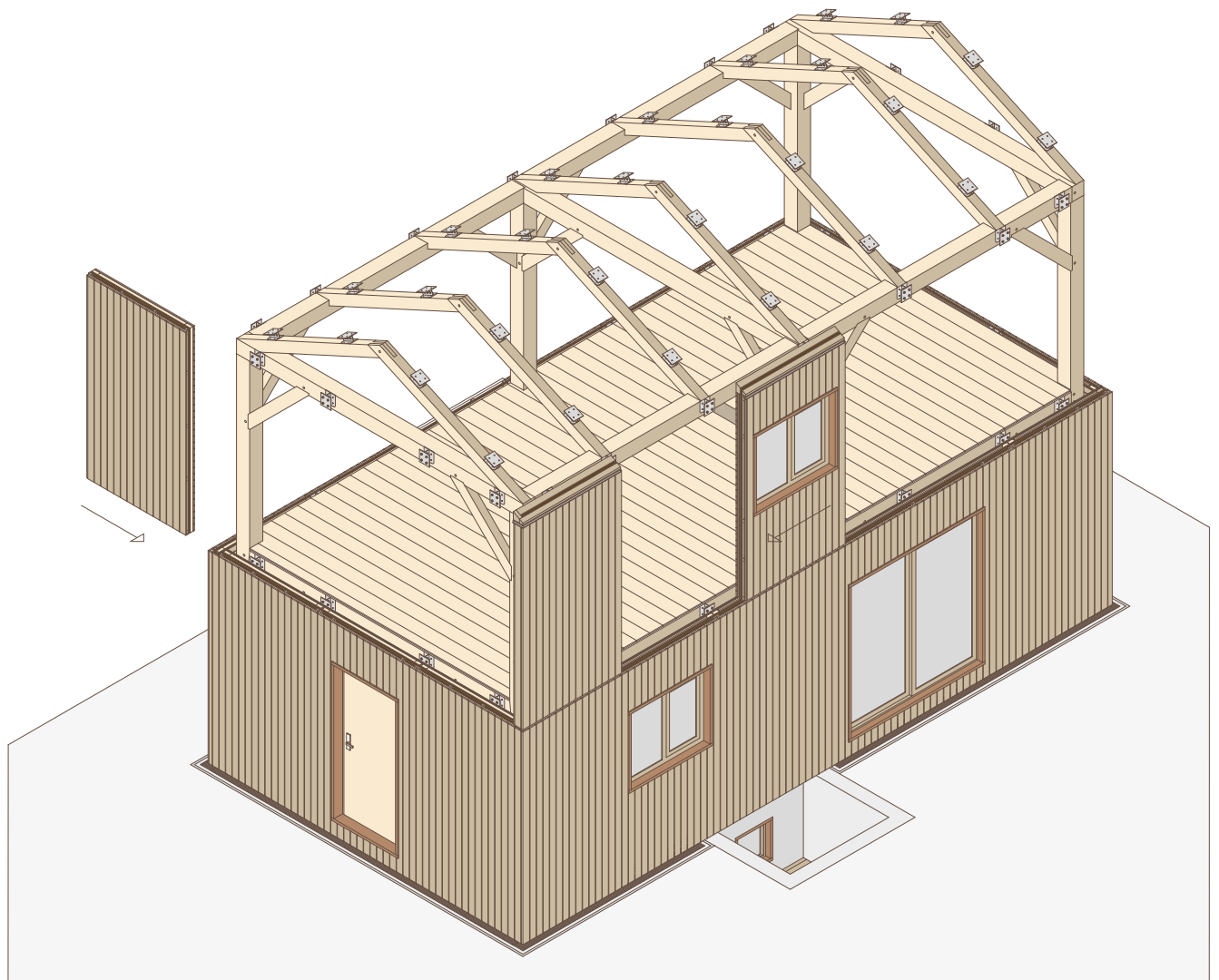
Encuentro Horizontal



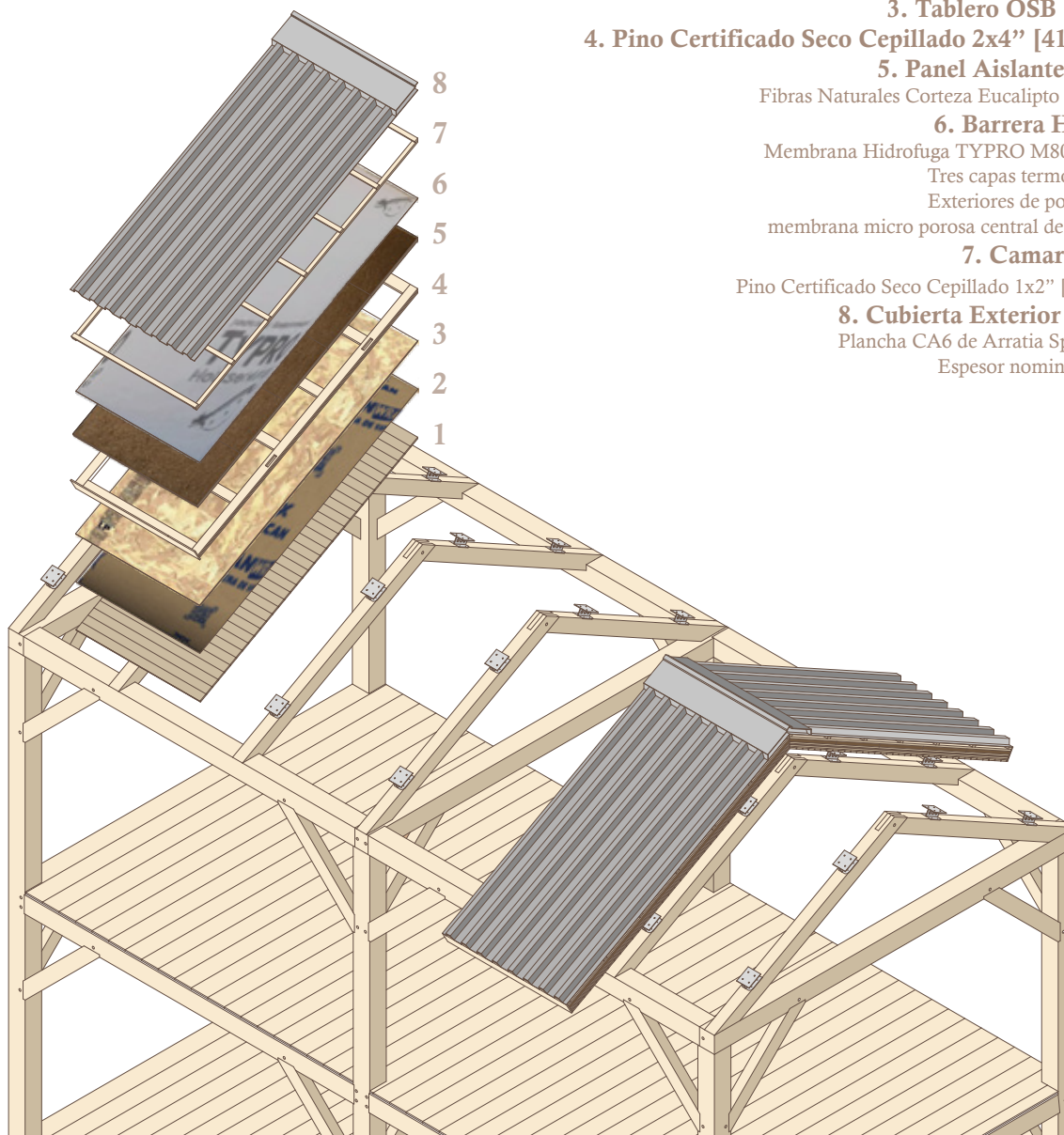
Encuentro Perpendicular



Encuentro Vertical.



2.2.2. Estratigrafía Techumbre.



1. Revestimiento Interior

MSD Arauco - Machihembrado $\frac{3}{4}$ " x 4" [14 mm]

2. Barrera Vapor

Lamina Volcán Wrap

Papel Kraft laminado con polietileno. [0,123 mm]

3. Tablero OSB [9,5 mm]

4. Pino Certificado Seco Cepillado 2x4" [41x90 mm]

5. Panel Aislante Aislacor

Fibras Naturales Corteza Eucalipto [41-30 mm]

6. Barrera Hidrofuga

Membrana Hidrofuga TYPRO M80 [0,15 mm]

Tres capas termolaminadas,

Exteriores de polipropileno,

membrana micro porosa central de polietileno.

7. Camara de Aire

Pino Certificado Seco Cepillado 1x2" [19x41 mm]

8. Cubierta Exterior Metálica

Plancha CA6 de Arratia SpA [50 mm]

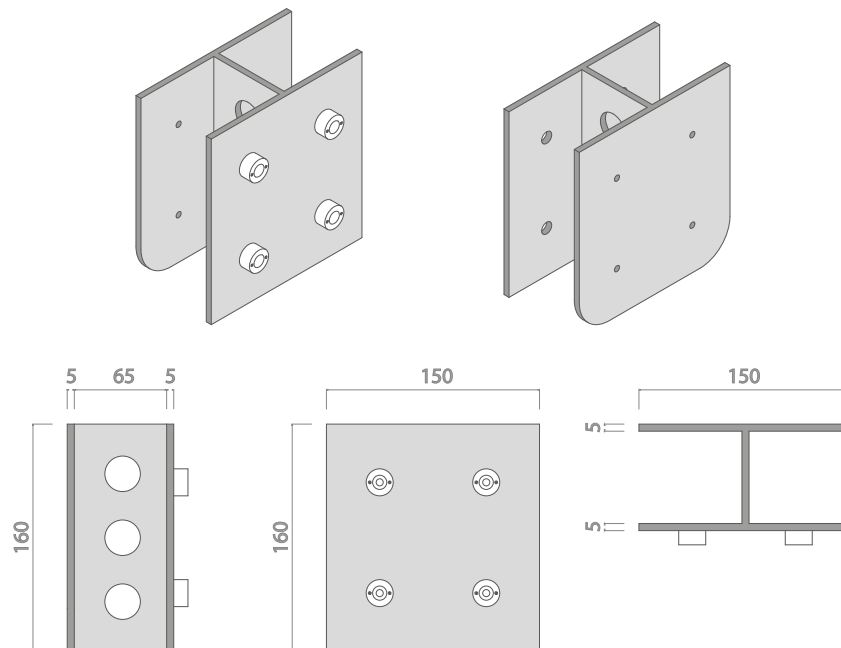
Espesor nominal [0,5 mm]

2.3. Diseño de la Vinculación Estructural.

Un componente crítico en el desarrollo del sistema envolvente modular radica en la eficiencia de sus nudos de conexión. La presente sección detalla el diseño de la pieza de vinculación estructural, un componente de acero A36 concebido para resolver la transferencia de cargas entre la envolvente autoportante y la estructura principal de entramado pesado de madera, integrando además la dimensión logística de montaje y la utilidad propuesta de canalización para las instalaciones domiciliarias.

2.2.1. Descripción Técnica del Conector Estructural.

El componente de vinculación se proyecta como un herraje industrializado bidireccional, fabricado a partir de tres placas soldadas de acero estructural A36 de 5 mm de espesor, galvanizado por inmersión en caliente mediante un baño de zinc fundido para proteger el componente frente a la corrosión. Estas placas configuran una volumetría general de 150 mm de longitud, 75 mm de ancho y 160 mm de altura (150 x 75 x 160 mm).



Para garantizar la durabilidad del componente frente a los ciclos higrotérmicos derivados de la interfaz madera con acero y la proximidad de sujeción a las redes hidráulicas, el herraje de acero A36 recibirá un tratamiento superficial de galvanizado por inmersión en caliente de acuerdo con la norma ASTM A123. Este revestimiento de zinc asegurará una protección por ánodo de sacrificio, impidiendo la degradación por corrosión galvánica o por condensación superficial en el núcleo del encuentro, manteniendo inalteradas las propiedades mecánicas del encuentro a lo largo de la vida útil proyectada para el componente.

2.2.2. Comportamiento Estructural mediante Análisis de Esfuerzos Mecánicos por Método de Elementos Finitos (MEF).

Con el objetivo de validar el desempeño estructural del componente de vinculación y unión con los paneles autoportantes, se realizó un análisis de esfuerzos mecánicos utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF). Específicamente, se sometió la pieza a un ensayo de criterios de falla mediante el entorno de simulación avanzada de Autodesk Inventor, empleando el modelo de tensión de Von Mises.

A. Parámetros de entrada y propiedades del material.

Para la simulación se configuraron las propiedades mecánicas estandarizadas del material de fabricación y las solicitaciones de carga reales a las que se verá expuesto el componente en su estado operacional límite:

Material Estructural: Acero Estructural ASTM A36
Límite de Fluencia (σ_y): 250 MPa (Límite Elástico)
Carga Operacional Límite: 50 kg (110 lbs) Correspondiente al peso propio límite del panel.
Tipo de Carga: Estática / Constante

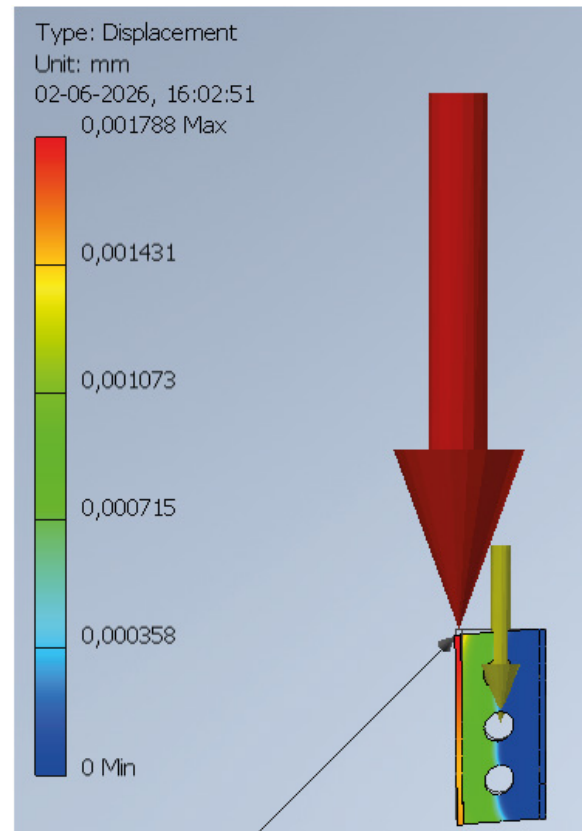
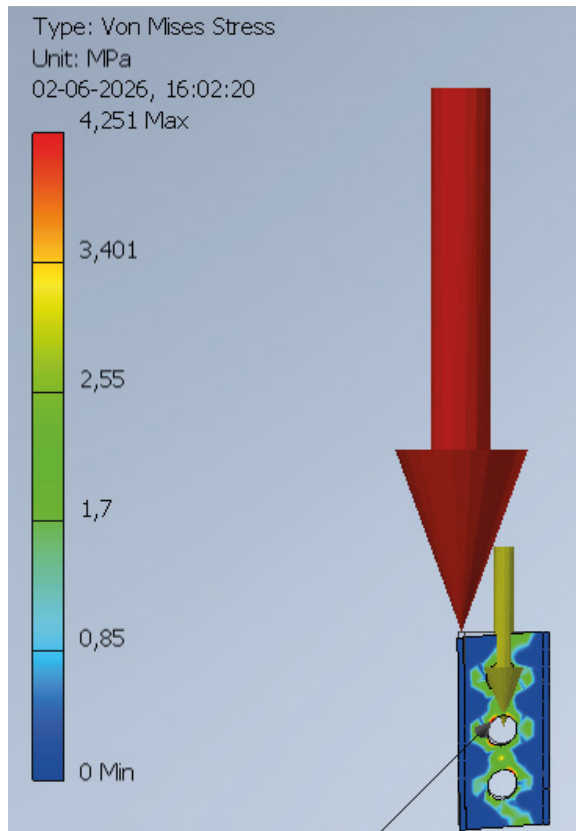
B. Resultados de la simulación de Esfuerzo de Von Mises.

Tras la ejecución del modelo numérico bajo condiciones de carga estática constante, se obtuvieron los siguientes indicadores de comportamiento tensional:

Esfuerzo Máximo Registrado ($\sigma_{\text{máx}}$): 4,25 MPa.

Ubicación Analizada: Zonas localizadas de la cara superior y lateral de la placa exterior, punto concéntrico que genera el encuentro directo de vinculación con los paneles autoportantes.

Estado General de Esfuerzos: Distribución de tensiones altamente localizada y significativamente inferior al límite crítico del material.



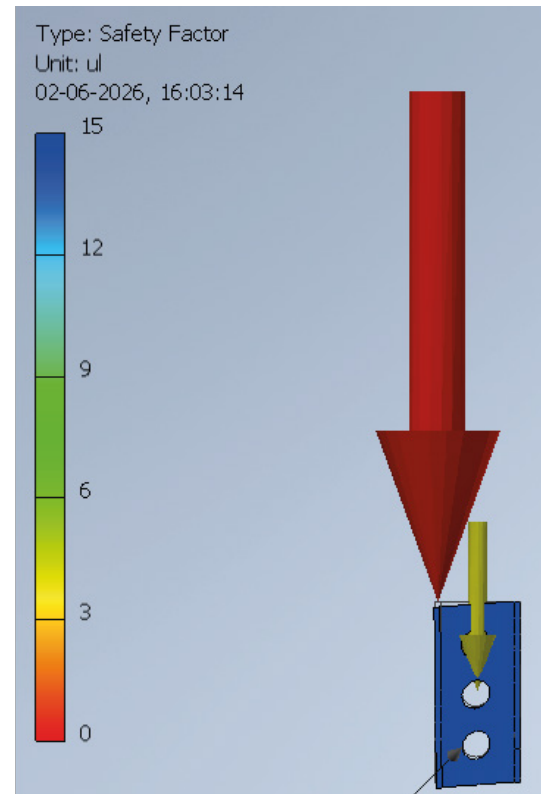
C. Evaluación del Factor de Seguridad (FS)

El factor de seguridad se determinó mediante la relación directa entre el límite de fluencia elástica del material y el esfuerzo máximo de trabajo debido a la carga de operación, expresado en la siguiente ecuación:

$$FS = \sigma_y / \sigma_{\text{máx}} = 250 \text{ Mpa} / 4,25 \text{ Mpa} = 58,8$$

El valor obtenido de $FS = 58,8$ indica que la pieza posee una reserva estructural excepcional que excede por completo los requerimientos técnicos solicitados. Desde la perspectiva de la resistencia mecánica estática, el diseño actual queda plenamente validado para su fabricación. El componente es capaz de resistir con total seguridad la fuerza operativa de 50 kg sin presentar riesgo de deformación plástica o falla mecánica.

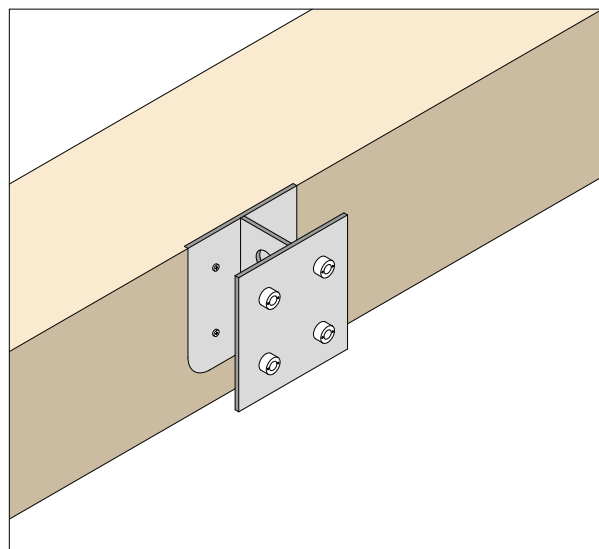
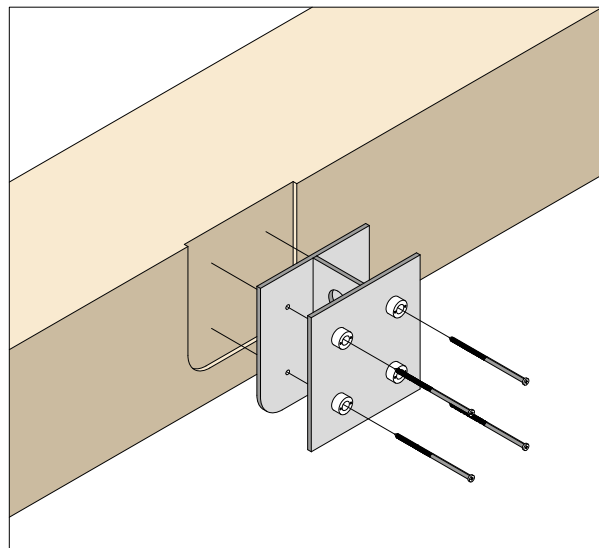
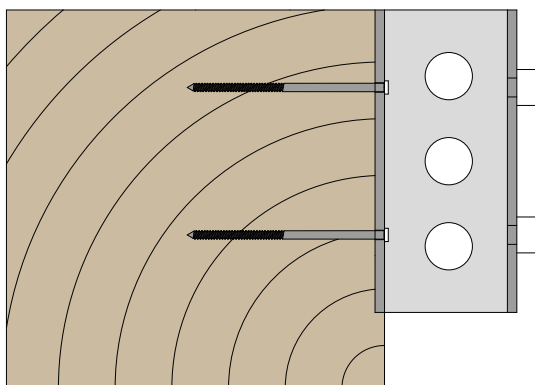
El elevado factor de seguridad evidenciado (58,8) plantea una clara oportunidad de optimización de recursos y diseño ingenieril. Se recomienda evaluar un rediseño del componente orientado a la reducción del espesor de la placa o a la modificación de su geometría para disminuir el peso final de las piezas de vinculación estructural, sin comprometer en ningún escenario la estabilidad y seguridad del sistema constructivo modular.



2.2.3. Fijación del Conector con el Entramado Pesado de Madera.

El conector se vincula a los elementos horizontales de la estructura primaria mediante un ensamble de palma mecanizado en la madera, el cual aloja el herraje y garantiza una sujeción de espera para los paneles.

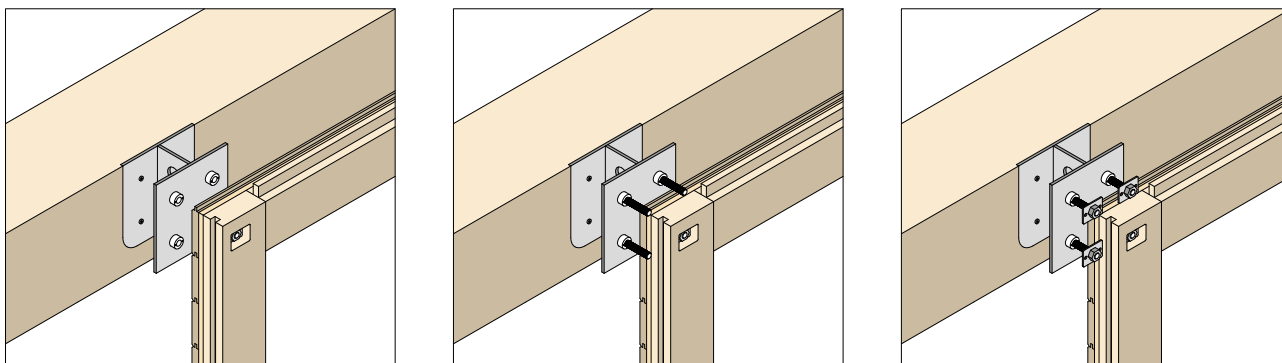
La fijación mecánica al entramado pesado de madera se compone de 4 tornillo tirafondo SPAX Hi. Force de 160 mm de largo x 8 mm de diámetro. Estos componentes están fabricados con acero y recubiertos con WIROX, una protección metálica anticorrosiva de alto rendimiento hasta 20 veces superior al galvanizado tradicional. Cuentan con una cabeza plana y ancha tipo arandela que maximiza la superficie de apoyo y la fuerza de tracción. Adicionalmente mediante su perfil ondulado en la rosca y punta 4CUT aportan un atornillado rápido sin efecto de hendidura.



2.2.4. Fijación del Conector con los Paneles y Lógica de Montaje Concéntrico.

Para el encuentro entre el conector y los paneles autoportantes se consideran cuatro pernos de sujeción hexagonales Grado 2, con un diámetro de hilo de 3/8" y una longitud de 4", especificados para resistir solicitaciones mecánicas de carga moderada gracias a su límite elástico y resistencia a la tracción aproximada de 420 Mpa. Juntos a estos se consideran cuatro golillas calibradas de 3/8" con un diámetro interior de 10 mm para evitar la indentación y concentración de tensiones en la madera.

Complementario a estos dos componentes, se presentan cuatro placas soldadas con 4 tuercas hexagonales de 3/8" respectivamente para consolidar el torque de apriete. Estas placas irían insertas en los extremos superiores e inferiores de los montantes verticales, que conforman el perímetro estructural de los paneles autoportantes. Estos cuentan con un cajeado o sacado de material geométrico en sus extremos. En el interior de esta abertura se instala de forma fija una placa conectora secundaria que lleva un perno soldado de fábrica. La distribución geométrica de estas cuatro placas está diseñada de manera estratégica para que cada una de ellas asegure de forma independiente una de las esquinas de los paneles concurrentes al nodo, generando un sistema de fijación modular perimetral.



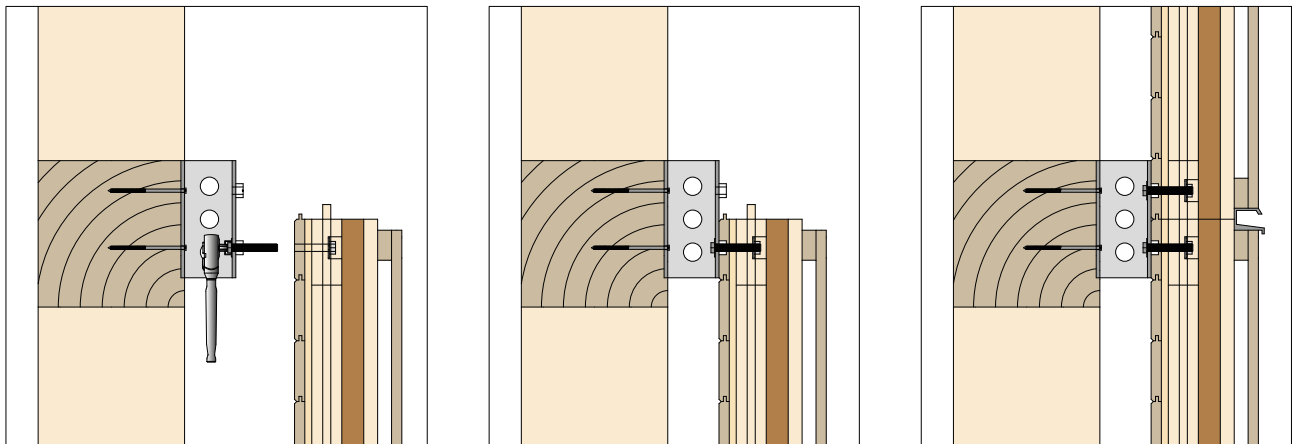
Para garantizar la transferencia de cargas y absorber las tolerancias dimensionales, el encuentro entre la envolvente y el conector se resuelve estructuralmente en los puntos críticos de la modulación, estas serían las esquinas de cada panel.

Para optimizar los tiempos de montaje en obra y reducir las tolerancias de error humano, el conector integra un sistema de guiado concéntrico. Se propone la incorporación de cuatro cilindros de technyl (poliamida 6 / PA6) de 25 mm de diámetro, los cuales actúan como bujes de centrado y amortiguación geométrica.

El protocolo de ensamble se define en dos tiempos secuenciales:

1. Posicionamiento y Concentricidad: El panel prefabricado es izado y aproximado al conector; los cilindros de tecnil reciben el peso y guían mecánicamente el panel hacia su posición nominal exacta, absorbiendo los esfuerzos de impacto inicial.

2. Fijación Estructural: Una vez alineado de forma concéntrica en torno al eje del tecnil, se introducen transversalmente los pernos hexagonales, consolidando el bloqueo cinemático y la fijación estructural definitiva del panel al herraje. Este ajuste en las cuatro esquinas restringe por completo los grados de libertad del panel, asegurando un comportamiento estructural solidario ante esfuerzos de volcamiento, cizalle o presiones de viento.



2.2.5. Utilidad del Conector: Soporte de Instalaciones Domiciliarias.

Más allá de su función estrictamente mecánica, el conector se diseña bajo un principio de eficiencia espacial e integración de subsistemas. El alma de la pieza de acero cuenta con tres perforaciones u orificios mecanizados estratégicamente.

Estas aperturas concéntricas permiten el paso físico y la continuidad horizontal de las tuberías y canalizaciones de las instalaciones domiciliarias de la vivienda. Al transformar el conector en un anillo de soporte para las redes, se evita el debilitamiento o perforación indiscriminada de las vigas estructurales de madera y de la integridad del panel envolvente, concentrando las pasadas técnicas en los nodos de acero y optimizando el traslado de las instalaciones de manera independiente.

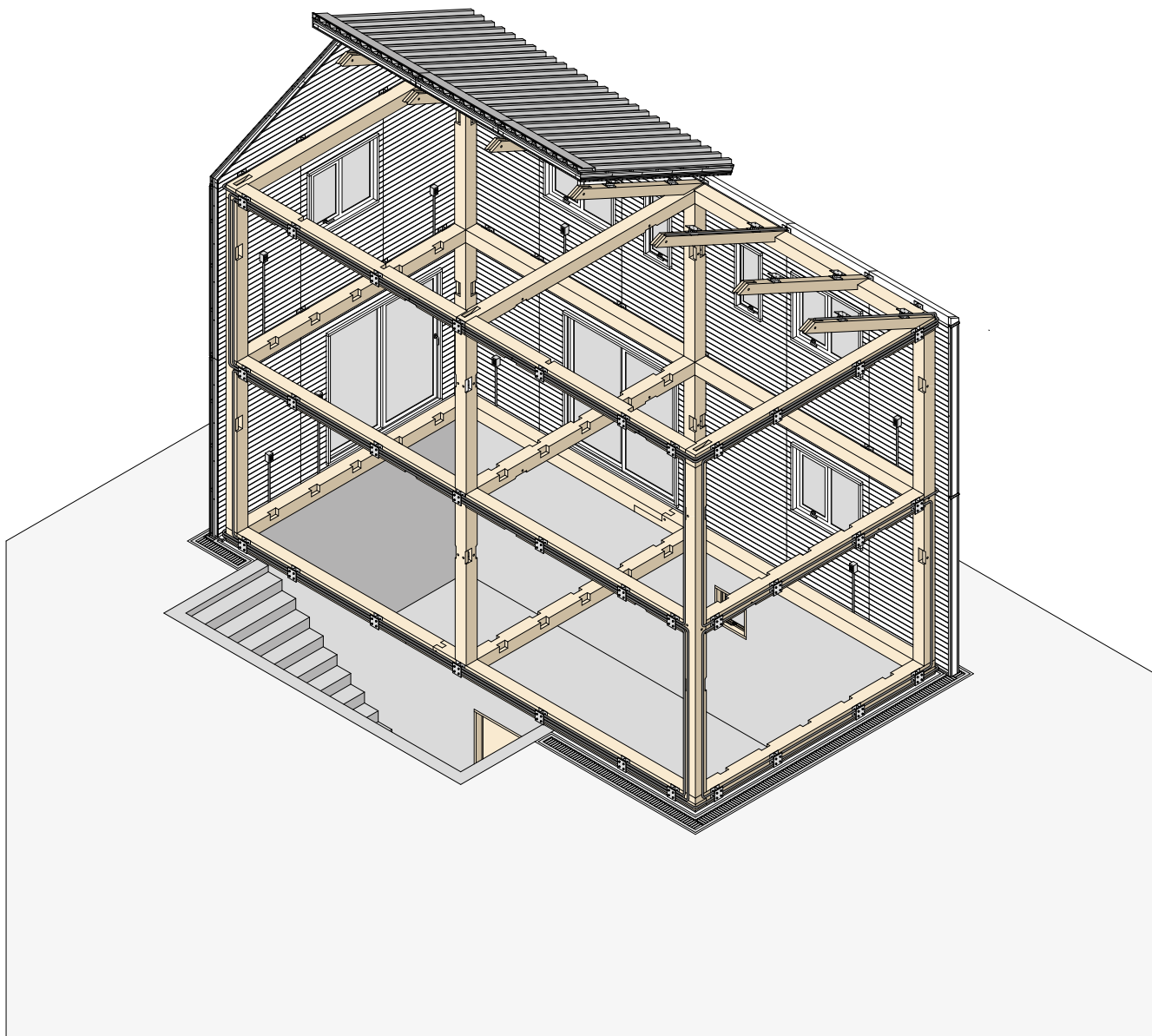
2.2.5. Red de Instalaciones.

El trazado de las redes de servicios se subordina a la ortogonalidad de la estructura de entramado pesado, trasladándose de manera limpia paralelamente a los elementos lineales como vigas y soleiras en sentido horizontal y pilares para las distribuciones verticales.

Para la correcta entrega en los recintos habitables, las matrices sufren pequeñas desviaciones y derivaciones controladas para empalmar con las cajas eléctricas y terminales superpuestos en los paneles autoportantes. El posicionamiento de estos terminales responde estrictamente a criterios ergonómicos de habitabilidad:

Cajas de Enchufe: Se proyectan a una distancia fija de 50 cm medidos linealmente desde el nivel de piso terminado (N.P.T.) hasta el eje de la caja receptora.

Cajas de Interruptores: Se proyectan mínimamente a una distancia vertical de 1,00 m desde el nivel de piso terminado (N.P.T.), asegurando la accesibilidad universal y la limpieza geométrica en el encuentro con la modulación vertical de los paneles.



La presente fase constituye la etapa de validación técnica normativa del sistema de envolvente modular propuesto. Su objetivo principal es verificar y demostrar el cumplimiento estricto de las exigencias para edificaciones residenciales establecidas en el Decreto Supremo No. 15 del MINVU, el cual introduce la nueva reglamentación térmica en Chile, con especial foco en la Macrozona Térmica H-I.

Esta macrozona representa el estándar de máxima exigencia a nivel nacional y describe dos áreas geográficas y climáticas críticas del territorio chileno: por un lado, la zona I ubicada en el extremo sur, siendo la zona más austral de Chile y, por otro, la zona H ubicada en el territorio andino y cordillerano del país. Ambas realidades comparten condiciones extremas de bajas temperaturas sostenidas y rigurosidad climática, lo que demanda una respuesta arquitectónica de alto desempeño térmico y un control higrotérmico impecable para garantizar la habitabilidad, la eficiencia energética y la durabilidad estructural.

Descripción de zonas comprometidas:

- [H] Arica a Vicuña [Sobre 3000 MSNM] [Región de Coquimbo]
Vicuña a San Fabián [Sobre 2000 hasta 1000 MSNM] [Región del Nuble]
San Fabián a Currarrehue - Pucón [Región Araucanía]
- [I] Futaleufú - Lago Palena [Región de Ríos] a Cabo de Hornos [Región de Magallanes y de la Antártica Chilena]

Para asegurar la viabilidad constructiva y el comportamiento óptimo de la envolvente habitacional bajo estas condiciones críticas, esta validación se articula de manera sistémica en torno a cuatro ejes fundamentales:

Transmitancia Térmica Máxima (U) y Resistencia Térmica Mínima (R): Evaluación cuantitativa de los complejos arquitectónicos que componen la envolvente, estos describen complejos de techumbre, muros perimetrales, piso ventilado, puertas opacas, ventanas y sobrecimientos. Se contrastará que los valores de diseño superen las resistencias térmicas mínimas y no excedan las transmitancias térmicas máximas permitidas por el DS N° 15 para la zona H-I.

Comportamiento Higrotérmico y Riesgo de Condensación: Análisis del perfil de presiones de vapor y temperaturas a través de las capas de los complejos de techumbre, muro perimetral y piso ventilado. Mediante este estudio se verificará la ausencia total de riesgo de condensación superficial e intersticial, resguardando la integridad de los componentes, especialmente previniendo patologías edilicias asociadas a la alta humedad y los gradientes térmicos severos de estas zonas.

Hermeticidad al Aire y Control de Infiltraciones: Focalizado en la partida de sellos y puentes térmicos. Se identifican y analizan los encuentros geométricos y constructivos más desfavorables o críticos del sistema modular. Para mitigar los flujos de aire no controlados, se desarrollan once detalles constructivos específicos que resuelven la continuidad de la envolvente en dichos puntos críticos.

Sistema de Ventilación y Calidad del Aire Interior: Diseño y verificación de la tasa de renovaciones de aire mínima exigida para espacios residenciales según la norma NCh 3309. Para responder de forma eficiente al clima de la macrozona H-I sin castigar la demanda de calefacción, el proyecto plantea un sistema de ventilación híbrido. Este sistema integra la admisión de aire mediante ventilas pasivas, con una extracción mecánica activa controlada por temporizadores e higrostatos, garantizando la evacuación oportuna de la humedad interior de manera automatizada.

3.1. Transmitancia térmica máxima y Resistencia térmica mínima.

3.1.1. Complejo de Techumbre.

Para esta verificación se utiliza la acreditación de método de cálculo simplificado de acuerdo con la NCH 853. Se toma una sección representativa que cubre la distancia entre dos pórticos del entramado pesado de madera junto a la distancia adicional del alero entregado para la vivienda.



Espesor capas, d [m]	Nombre Sección: Fracción de área, f:	Sección A	Sección B	RT eq [m²K/W]
		PINO 2X4"	AISLACOR	
		0,110	0,890	
0,038	Capa 1	Gases - aire, $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,025$ [W/mK], $\mu = 1$	Gases - aire, $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,025$ [W/mK], $\mu = 1$	1,520
0,00015	Capa 2	membrana respirable, $R = 0$ [m²K/W], $S_d = 0,2$ [m]	membrana respirable, $R = 0$ [m²K/W], $S_d = 0,2$ [m]	0,000
0,03	Capa 3	AISLACOR [FIBRA EUCALIPTO], $\lambda = 0,036$ [W/mK], $\mu = 3,7$ []	AISLACOR [FIBRA EUCALIPTO], $\lambda = 0,036$ [W/mK], $\mu = 3,7$ []	0,833
0,041	Capa 4	Pino insigne $\rho = 410 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,104$ [W/mK], $\mu = 64$ []	AISLACOR [FIBRA EUCALIPTO], $\lambda = 0,036$ [W/mK], $\mu = 3,7$ []	0,943
0,0095	Capa 5	Tableros de madera - Contrachapada, $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,13$ [W/mK], $\mu = 200$	Tableros de madera - Contrachapada, $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,13$ [W/mK], $\mu = 200$	0,073
0,000123	Capa 6	Volcán Wrap, $R = 0$ [m²K/W], $\mu = 125839$ []	Volcán Wrap, $R = 0$ [m²K/W], $\mu = 125839$ []	0,000
0,014	Capa 7	Pino insigne $\rho = 410 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,104$ [W/mK], $\mu = 64$ []	Pino insigne $\rho = 410 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,104$ [W/mK], $\mu = 64$ []	0,135
Espesor total = 0,1328 [m]		RT sección [m²K/W] = 3,36	4,10	

Resultados

A continuación se muestra el resultado obtenido para la acreditación de los requerimientos térmicos del elemento, dependiendo de si se realizó un cálculo por el método simplificado o mediante el valor R100 del material aislante térmico presente en la solución.

Descripción del elemento:

COMPLEJO TECHUMBRE

Transmitancia térmica total sin corregir, U =

0,253

[W/m²K]

Corrección a la transmitancia térmica total, ΔU =

0,00

[W/m²K]

Transmitancia térmica total, U =

0,25

[W/m²K]

Porcentaje de corrección

0,00

%

Emplazamiento	U máximo	¿Cumple?
Macrozona H/I	0,25	☒

3.1.2. Complejo de Muro Perimetral.

Para esta verificación se utiliza la acreditación de método de cálculo simplificado de acuerdo con la NCH 853. Se toma una sección representativa que cubre la distancia entre dos pórticos del entramado pesado de madera.



Interior - Exterior	Capas	Espesor capas, d [m]	Nombre Sección: Fracción de área, f:	Sección A	Sección B	RT eq [m²K/W]
				PINO 2X4"	AISLACOR	
				0,120	0,880	
		0,038	Capa 1	Gases - aire, ρ = 1,23 kg/m³, λ = 0,025 [W/mK], μ = 1	Gases - aire, ρ = 1,23 kg/m³, λ = 0,025 [W/mK], μ = 1	1,520
		0,00015	Capa 2	membrana respirable, R = 0 [m²K/W], Sd = 0,2 [m]	membrana respirable, R = 0 [m²K/W], Sd = 0,2 [m]	0,000
		0,03	Capa 3	AISLACOR [FIBRA EUCALIPTO], λ = 0,036 [W/mK], μ = 3,7 []	AISLACOR [FIBRA EUCALIPTO], λ = 0,036 [W/mK], μ = 3,7 []	0,833
		0,041	Capa 4	Pino insigne ρ = 410 kg/m³, λ = 0,104 [W/mK], μ = 64 []	AISLACOR [FIBRA EUCALIPTO], λ = 0,036 [W/mK], μ = 3,7 []	0,928
		0,0095	Capa 5	Tableros de madera - Contrachapada, ρ = 500 kg/m³, λ = 0,13 [W/mK], μ = 200	Tableros de madera - Contrachapada, ρ = 500 kg/m³, λ = 0,13 [W/mK], μ = 200	0,073
		0,000123	Capa 6	Volcán Wrap, R = 0 [m²K/W], μ = 125839 []	Volcán Wrap, R = 0 [m²K/W], μ = 125839 []	0,000
		0,014	Capa 7	Pino insigne ρ = 410 kg/m³, λ = 0,104 [W/mK], μ = 64 []	Pino insigne ρ = 410 kg/m³, λ = 0,104 [W/mK], μ = 64 []	0,135
		Espesor total = 0,1328 [m]	RT sección [m²K/W] =	3,13	3,87	

Resultados

A continuación se muestra el resultado obtenido para la acreditación de los requerimientos térmicos del elemento, dependiendo de si se realizó un cálculo por el método simplificado o mediante el valor R100 del material aislante térmico presente en la solución.

Descripción del elemento:

COMPLEJO MURO PERIMETRAL

Transmitancia térmica total sin corregir, U =

0,269 [W/m²K]

Corrección a la transmitancia térmica total, ΔU =

0,00 [W/m²K]

Transmitancia térmica total, U =

0,27 [W/m²K]

Porcentaje de corrección

0,00%

Emplazamiento	U máximo	¿Cumple?
Macrozona H/I	0,3	✔

3.1.3. Complejo de Piso Ventilado.

Para esta verificación se utiliza la acreditación de método de cálculo simplificado de acuerdo con la NCH 853. Se toma una sección representativa que cubre la distancia entre dos pórticos del entramado pesado de madera.



Interior - Exterior Capas	Espesor capas, d [m]	Nombre Sección: Fracción de área, f:	Sección A	Sección B	Sección C	RT eq [m²K/W]
			MADERA 8x8" 0,270	PINO 2x2" 0,110	AISLACOR 0,620	
	0,149	Capa 1	Pino insigne p = 410 kg/m³, λ = 0,104 [W/mK], μ = 64 []	Gases - aire, p = 1,23 kg/m³, λ = 0,025 [W/mK], μ = 1	Gases - aire, p = 1,23 kg/m³, λ = 0,025 [W/mK], μ = 1	3,216
	0,01	Capa 2	Pino insigne p = 410 kg/m³, λ = 0,104 [W/mK], μ = 64 []	Fibrocemento p = 1350 kg/m³, λ = 0,23 [W/mK], μ = 200 []	Fibrocemento p = 1350 kg/m³, λ = 0,23 [W/mK], μ = 200 []	0,051
	0,041	Capa 3	Pino insigne p = 410 kg/m³, λ = 0,104 [W/mK], μ = 64 []	Pino insigne p = 410 kg/m³, λ = 0,104 [W/mK], μ = 64 []	AISLACOR [FIBRA EUCAUPTO], λ = 0,036 [W/mK], μ = 3,7 []	0,663
	0,00037	Capa 4	Fieltro M-3: 15 Libras, R = 0 [m²K/W], μ = 294 []	Fieltro M-3: 15 Libras, R = 0 [m²K/W], μ = 294 []	Fieltro M-3: 15 Libras, R = 0 [m²K/W], μ = 294 []	0,000
	0,018	Capa 5	Tableros de madera - Contrachapada, p = 500 kg/m³, λ = 0,13 [W/mK], μ = 200	Tableros de madera - Contrachapada, p = 500 kg/m³, λ = 0,13 [W/mK], μ = 200	Tableros de madera - Contrachapada, p = 500 kg/m³, λ = 0,13 [W/mK], μ = 200	0,138
	0,015	Capa 6	Pino insigne p = 410 kg/m³, λ = 0,104 [W/mK], μ = 64 []	Pino insigne p = 410 kg/m³, λ = 0,104 [W/mK], μ = 64 []	Pino insigne p = 410 kg/m³, λ = 0,104 [W/mK], μ = 64 []	0,144
Espesor total = 0,2334 [m]			RT sección [m²K/W] = 2,42	6,89	7,64	

Resultados

A continuación se muestra el resultado obtenido para la acreditación de los requerimientos térmicos del elemento, dependiendo de si se realizó un cálculo por el método simplificado o mediante el valor R100 del material aislante presente en la solución.

Descripción del elemento:COMPLEJO PISO VENTILADO

Transmitancia térmica total sin corregir, U =0,217[W/m²K]

Corrección a la transmitancia térmica total, ΔU =0,00[W/m²K]

Transmitancia térmica total, U =0,22[W/m²K]

Porcentaje de corrección0,00%

Emplazamiento	U máximo	¿Cumple?
Macrozona H/I	0,32	✓

Para esta verificación se utiliza la acreditación mediante la adopción de una solución constructiva inscrita en el listado oficial de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico “ED13 del 2025”, elaborado por el ministerio de vivienda y urbanismo. Texto aprobado por resolución exenta N° 764 (V. y U.) el 4 de junio de 2025. Se toma la solución código 3.1.P.M.002 que describe una puerta de madera con una hoja de 0,85x2 m, un valor de transmitancia térmica (U) de 1,7 [W/m²K] y una clase de permeabilidad al aire No. 3.

	LISTADO OFICIAL DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO	E13
---	---	------------

3.1.P.M.0.02	Puerta, 1 hoja 0,85x2 m	Línea: _____	Institución: CITEC	Vigencia: NCh3137/1 - NCh3297
---------------------	-------------------------	--------------	--------------------	-------------------------------

ACREDITACIÓN		
COMPORTAMIENTO TÉRMICO PERMEABILIDAD AL AIRE	MECANISMO Memoria de Cálculo NCh3137/1 y NCh3137/2 Ensayo NCh3297	RESPONSABLE DITEC - MINVU CITEC - UBB

DESEMPEÑO				
TRANSMITANCIA TÉRMICA, U [W/m²K]	1,7	PERMEABILIDAD AL AIRE A 100 Pa	7,00 2,08	[m³/hm²] [m³/hm] CLASE DE PERMEABILIDAD AL AIRE
				3

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
GENERALES			
Tipo abertura: Abatible	Tipo de acristalamiento: n/a	Materialidad del marco: Madera	
Configuración: 1 hoja	Color: Madera	Mecanismo de cierre: Cerradura embutida con cilindro en ambos lados, cerrojo de dos	
MEDIDAS GENERALES			
Ancho: 850 [mm]	Superficie: 1,70 [m²]	Alto: 2000 [mm]	Longitud de junta: _____ [m]
* PARA VARIACIONES DE HASTA 100% EN LA SUPERFICIE TOTAL DE LA PUERTA, SE MANTIENE LA CLASE DE PERMEABILIDAD AL AIRE INDICADA			
DETALLE MARCO			
Rotura puente térmico: n/a	Factor de marco: _____	DETALLE SECCIÓN ACRISTALADA	
Refuerzo: n/a	Gas de cavidad(es) interior(es): n/a	Factor solar composición acristalada: _____	[mm]
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]

OTRAS CARACTERÍSTICAS Brasa: No posee; despieces: No posee; bisagras: Sin especificar; burletes: Caucho tipo P en todo el perímetro. Burlete caucho parte inferior hoja hasta NPT.
--

Diagrama de un elemento de placa rectangular en un sistema de coordenadas global (x, y) y local (x', y').

Se muestran tres cortes:

- corte $x-x'$** : Vista horizontal del elemento, mostrando los bordes laterales con el material "Borlete caucho".
- corte $y-y'$** : Vista vertical del elemento, mostrando los bordes superior e inferior con el material "Borlete caucho".
- elevación exterior**: Vista superior del elemento, mostrando la forma rectangular y la posición de los ejes x, y y x', y' . Los ejes x y y están desplazados respecto a los ejes x' y y' .

3.1.5. Complejo de Ventanas.

Para esta verificación se utiliza la acreditación mediante la adopción de una solución constructiva inscrita en el listado oficial de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico “ED13 del 2025”, elaborado por el ministerio de vivienda y urbanismo. Texto aprobado por resolución exenta N° 764 (V. y U.) el 4 de junio de 2025.

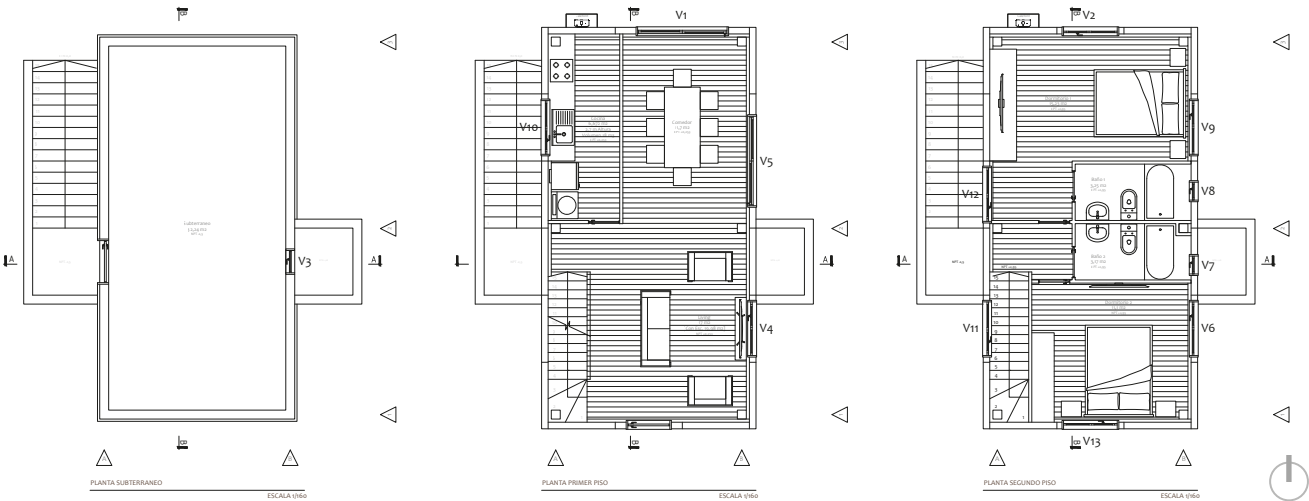
3.1.5.1. Definición de Orientaciones de Muros Perimetrales.

Se deberá determinar la orientación predominante para cada muro perimetral de la unidad habitacional a partir de la dirección normal, que corresponde a la línea imaginaria perpendicular al plano de fachada, expresada en grados sexagesimales. La dirección 0° estará definida por el norte geográfico, por lo que las orientaciones estarán limitadas de acuerdo con lo establecido en la Tabla 4 del DS No.15.

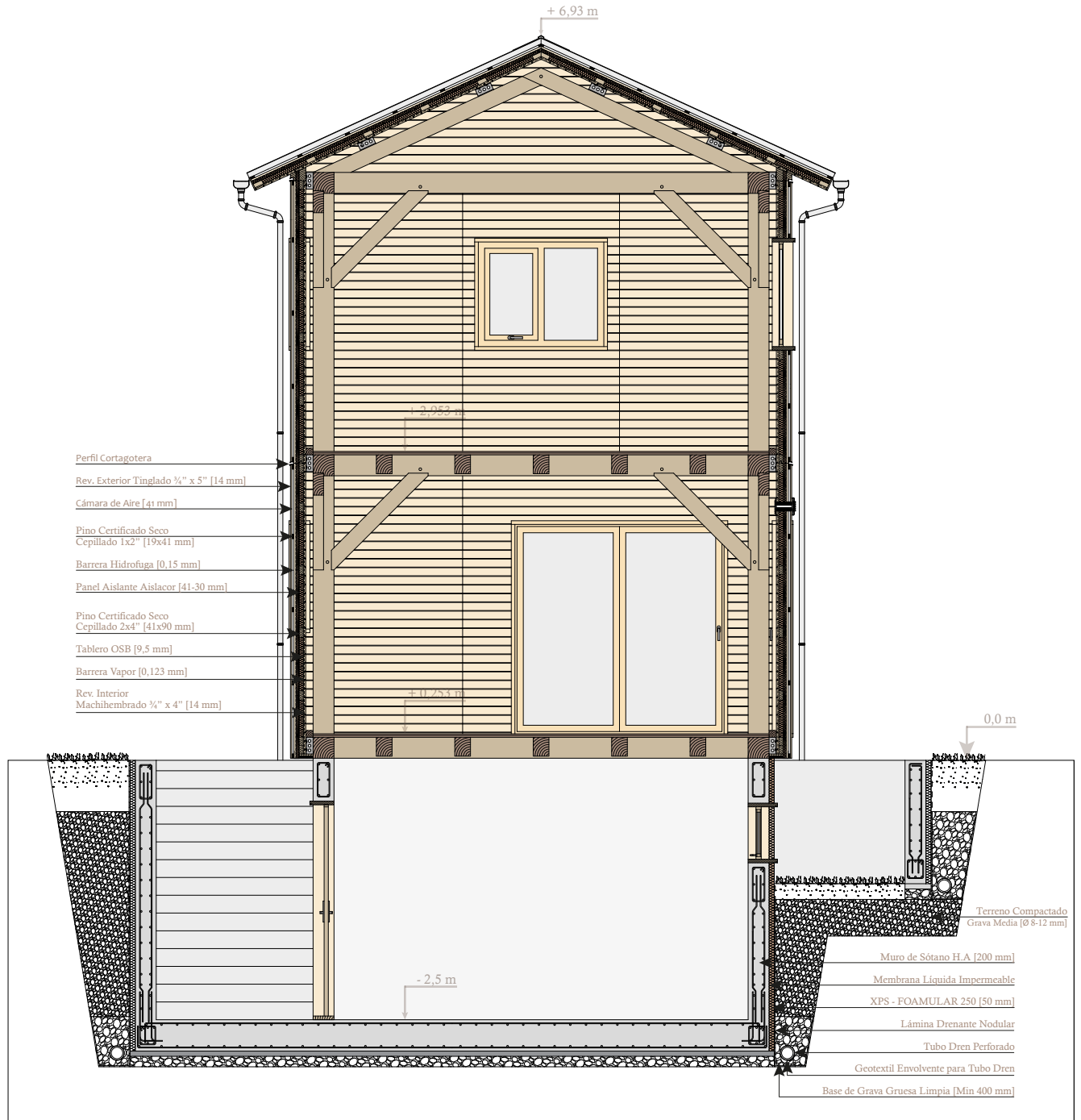
ORIENTACIÓN	RANGO
NORTE	Mayor o igual a 315° y menor que 45°
ORIENTE	Mayor o igual a 45° y menor que 135°
SUR	Mayor o igual a 135° y menor que 225°
PONIENTE	Mayor o igual a 225° y menor que 315°



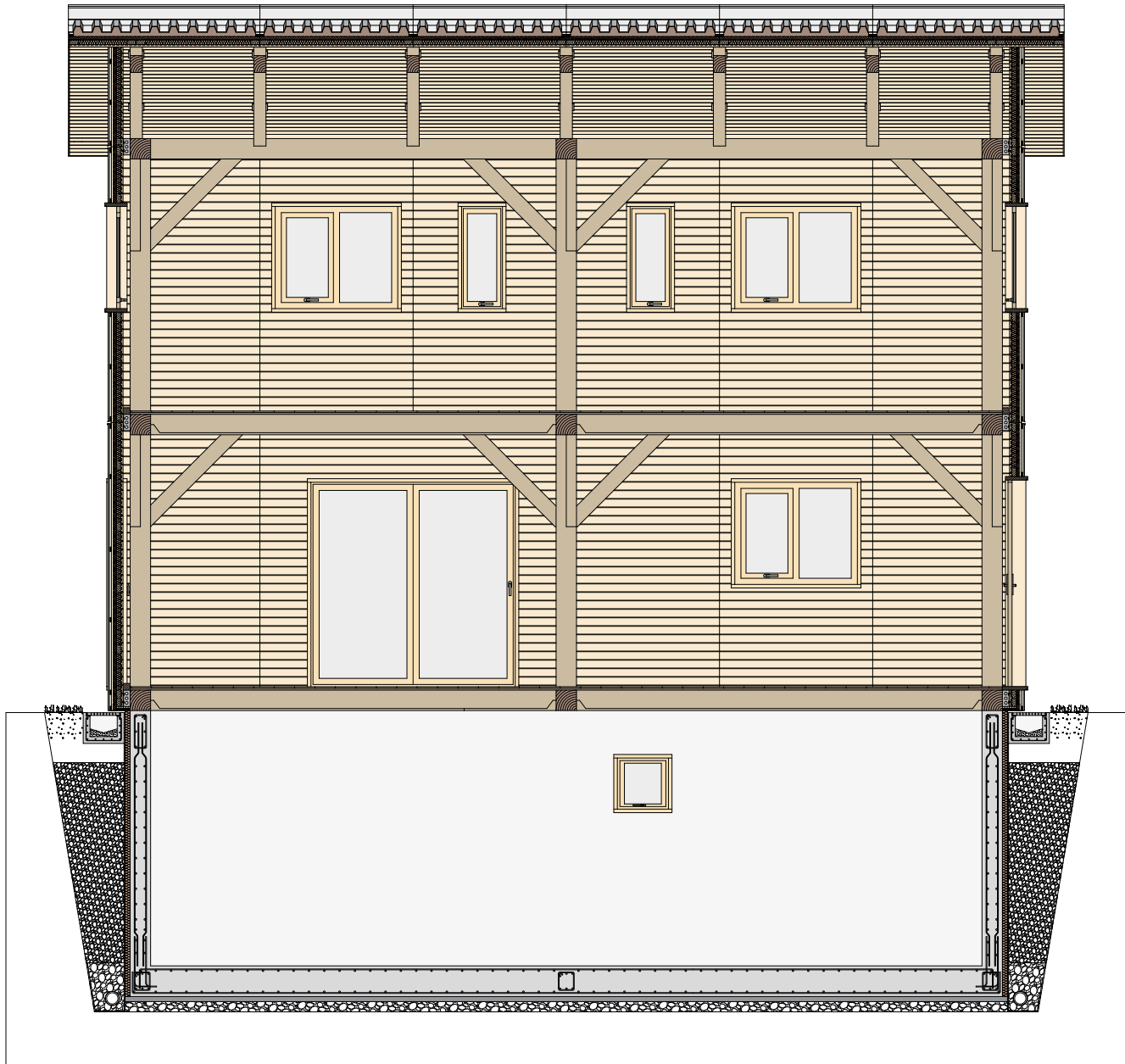
Tabla 4.



Corte A -A [e. 1:60]



Corte B -B [e. 1:62]



3.1.5.2. Adopción de Soluciones Constructivas para Complejo de Ventanas.

Se presenta la adopción de soluciones constructivas para el complejo de ventanas identificadas por orientación, se identifican por número de catálogo establecido en “ED13 del 2025”, justo a su superficie, transmitancia térmica y clase de permeabilidad al aire.

Adopción de Soluciones Constructivas para Complejo de Ventanas					
Nº Ventana	Codigo Minvu	Superficie Ventana (m²)	Transmitancia térmica [W/(m²K)]	Clase Permeabilidad al Aire	Orientación
V1	3.2.V.A.C.1.05	4	3,3	3	Norte
V2	3.2.V.P.A.0.06	1,2	3,1	4	
V3	3.2.V.P.P.0.06	0,25	2,9	4	
V4	3.2.V.P.A.0.06	1,2	3,1	4	Oriente
V5	3.2.V.A.C.1.05	4	3,3	3	
V6	3.2.V.P.A.0.06	1,2	3,1	4	
V7	3.2.V.P.P.3.01	0,5	2,7	3	
V8	3.2.V.P.P.3.01	0,5	2,7	3	
V9	3.2.V.P.A.0.06	1,2	3,1	4	
V10	3.2.V.P.A.0.06	1,2	3,1	4	Poniente
V11	3.2.V.P.A.0.06	1,2	3,1	4	
V12	3.2.V.P.A.0.06	1,2	3,1	4	
V13	3.2.V.P.A.0.06	1,2	3,1	4	Sur

3.1.5.3. Verificación de transmitancia térmica ponderada máxima.

Se verifica una transmitancia térmica limite del complejo de ventanas utilizadas en 3,3 W/(m²K) menor a 3,6 W/(m²K), por lo cual se permite la verificación por método de Upvm. Se debe cumplir como exigencia de la macrozona H-I con un Upvm igual o menor a 1,85 W/(m²K) para la orientación norte, 0,96 W/(m²K) para las orientaciones oriente y poniente y 0,68 W/(m²K) para la orientación sur, tal como lo indica la tabla 5 del DS No. 15 del Minvu.

Para efectos de identificar el valor correcto de transmitancia térmica de ventanas en una misma orientación, el Upvm se determinará utilizando el valor U mayor de las ventanas de dicha orientación, por consecuencia se escoge el valor mas desfavorable de las respectivas ventanas por orientación.

ZONA TÉRMICA	ORIENTACIÓN	Upvm máximo [W/m²K] SEGÚN TRANSMITANCIA TÉRMICA "U" DE VENTANA								
		≤0,6	≤0,8	≤1,2	≤1,6	≤2,0	≤2,4	≤2,8	≤3,2	≤3,6
H/I	Norte	0,53	0,68	0,95	1,19	1,41	1,60	1,75	1,83	1,85
	O – P	0,40	0,47	0,59	0,70	0,79	0,87	0,93	0,97	0,96
	Sur	0,39	0,45	0,54	0,63	0,69	0,72	0,74	0,72	0,68

Tabla 5

ORIENTACION	NORTE	
Transmitancia térmica del muro	0,27	[W/(m²K)]
Superficie del muro (sin ventanas)	23,2	[m²]
Transmitancia térmica de la ventana	3,3	[W/(m²K)]
Superficie de ventana	5,2	[m²]
Superficie total (Muro + Ventana)	28,4	[m²]

ORIENTACION	ORIENTE	
Transmitancia térmica del muro	0,27	[W/(m²K)]
Superficie del muro (sin ventanas)	41,4	[m²]
Transmitancia térmica de la ventana	3,3	[W/(m²K)]
Superficie de ventana	8,9	[m²]
Superficie total (Muro + Ventana)	50,3	[m²]

ORIENTACION	PONIENTE	
Transmitancia térmica del muro	0,27	[W/(m²K)]
Superficie del muro (sin ventanas)	46,7	[m²]
Transmitancia térmica de la ventana	3,1	[W/(m²K)]
Superficie de ventana	3,6	[m²]
Superficie total (Muro + Ventana)	50,3	[m²]

ORIENTACION	SUR	
Transmitancia térmica del muro	0,27	[W/(m²K)]
Superficie del muro (sin ventanas)	27,2	[m²]
Transmitancia térmica de la ventana	3,1	[W/(m²K)]
Superficie de ventana	1,2	[m²]
Superficie total (Muro + Ventana)	28,4	[m²]

Upvm Solución Propuesta	0,82	Upvm Maximo Permitido	1,85
Cumplimiento		CUMPLE	
Upvm Solución Propuesta	0,81	Upvm Maximo Permitido	0,96
Cumplimiento		CUMPLE	
Upvm Solución Propuesta	0,47	Upvm Maximo Permitido	0,96
Cumplimiento		CUMPLE	
Upvm Solución Propuesta	0,39	Upvm Maximo Permitido	0,68
Cumplimiento		CUMPLE	

3.1.6. Complejo de Sobrecimientos.

Para dar cumplimiento a esta exigencia se describe el uso de paneles aislantes de espuma rígida de poliestireno extruido (XPS) de alta densidad “FOAMULAR 250” con un espesor de 5 cm, fabricados por la marca OWENS CORNING adheridos por la cara exterior de la cimentación, desde el nivel superior del muro de hormigón hasta el nivel de apoyo de este con el terreno compactado. El material aislante utilizado en los cimientos deberá tener una resistencia térmica igual o superior a la indicada en la Tabla 6 del DS No. 15 del Minvu. El radier afinado sobre el terreno, no tendrá exigencia de colocación de material aislante bajo este.

TABLA 6. Resistencia térmica R100 mínima del material aislante térmico utilizado en los sobrecimientos de pisos sobre el terreno.	
ZONA TÉRMICA	AISLACIÓN TÉRMICA DE SOBRECIMIENTO
	R100 Mín
	[(m²K)/W]x100
H	91
I	91
(*) Según norma Nch 2251: R100 Valor equivalente a la Resistencia Térmica (m²K/W)x100.	

MATERIAL	e (m)	λ (W/(m/K)	Rt (m²K/W)
XPS - AISLAMIENTO OWENS CORNING FOAMULAR 250	0,05	0,028	1,786
R100			178,57

3.2. Condensación superficial e intersticial.

Para verificar el cumplimiento de esta exigencia se debe verificar que en los complejos de techumbre, muros perimetrales y piso ventilado no exista riesgo de condensación superficial e intersticial, de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma chilena “NCh 1973” y a las condiciones de cálculo que establece el Ministerio de Vivienda y Urbanismo mediante la resolución exenta No. 1802.

Para efectos de calculo se considera una condición de análisis para el mes de Julio, con una temperatura exterior de - 1,6 °C, una humedad relativa exterior del 93 %, una temperatura interior de 19 °C y una humedad relativa interior del 75 %. Los cálculos se realizan en al menos dos secciones de la solución propuesta, una sección de mayor resistencia térmica y otra de menor resistencia térmica, representativa a la zona critica como lo serían los puentes térmicos.

Para efectos de excepciones, las soluciones de techumbre y muros perimetrales consideran un revestimiento exterior con cámaras de aire hacia la cara interior, por lo cual no debe considerarse dicho revestimiento en el cálculo, según lo establecido en la resolución exenta No. 1802.

CONDENSACIÓN SEGÚN NCH1973.OF2014

Condiciones de análisis

	Julio	
Temp. exterior, Θ_e	-1,6 °C	
HR exterior, ϕ_e	93%	
Temp. interior, Θ_i	19 °C	
HR interior, ϕ_i	75%	
HR crítica, ϕ_{sicc}	100%	ϕ_{sicc} por defecto 100%
Mobiliario	Si	

3.2.1. Complejo de Techumbre.

Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el análisis de riesgo de condensación superficial e intersticial del elemento, de acuerdo con NCh1973.2014.

Descripción del elemento:	COMPLEJO TECHUMBRE		
Zona Térmica	Macrozona H/I		
Alcance:	Todas las comunas excepto Calama, San Pedro de Atacama, Antártica chilena, Futaleufú y Palena		

Condensación superficial

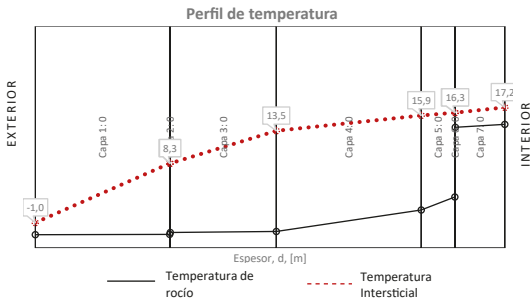
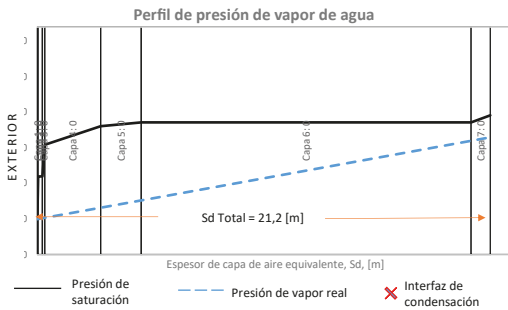
¿Cumple?		Todas las secciones analizadas tienen una resistencia térmica total mayor o igual al mínimo requerido. La condición más estricta para el emplazamiento ocurre en el mes de Julio.
----------	--	---

Condensación intersticial

¿Cumple?		No se predice condensación en ninguna interfaz de ninguna sección.
----------	--	--

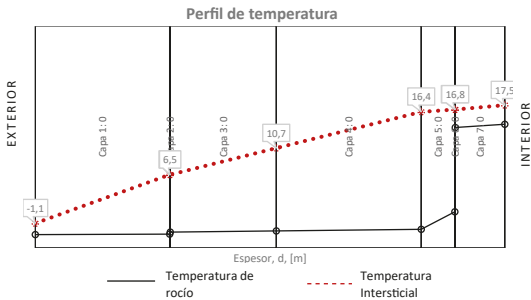
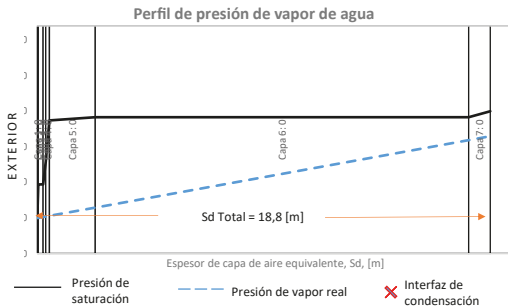
Sección de análisis para gráficos: A PINO 2X4"

Mes de análisis para gráficos: Julio



Sección de análisis para gráficos: B AISLACOR

Mes de análisis para gráficos: Julio



3.2.2. Complejo de Muro Perimetral.

Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el análisis de riesgo de condensación superficial e intersticial del elemento, de acuerdo con NCh1973.2014.

Descripción del elemento:

COMPLEJO MURO PERIMETRAL

Zona Térmica

Macrozona H/I

Alcance:

Todas las comunas excepto Calama, San Pedro de Atacama, Antártica chilena, Futaleufú y Palena

Condensación superficial

¿Cumple?		Todas las secciones analizadas tienen una resistencia térmica total mayor o igual al mínimo requerido. La condición más estricta para el emplazamiento ocurre en el mes de Julio.
----------	-------------	---

Condensación intersticial

¿Cumple?		No se predice condensación en ninguna interfaz de ninguna sección.
----------	-------------	--

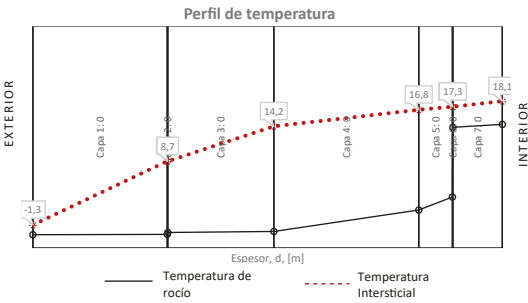
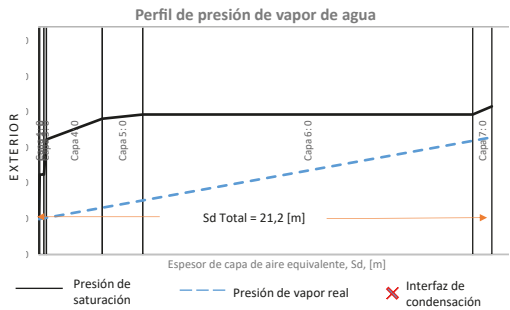
Sección de análisis para gráficos:

A

PINO 2X4"

Mes de análisis para gráficos:

Julio



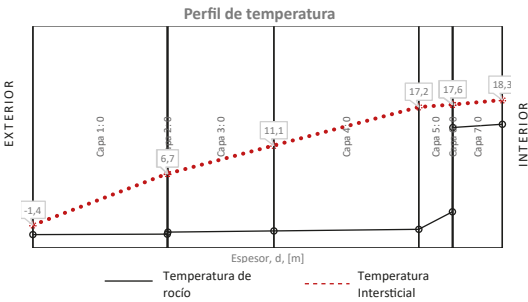
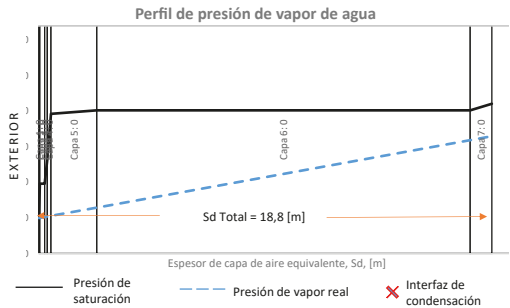
Sección de análisis para gráficos:

B

AISLACOR

Mes de análisis para gráficos:

Julio



3.2.3. Complejo de Piso Ventilado.

Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el análisis de riesgo de condensación superficial e intersticial del elemento, de acuerdo con NCh1973.2014.

Descripción del elemento:	COMPLEJO PISO VENTILADO		
Zona Térmica	Macrozona H/I		
Alcance:	Todas las comunas excepto Calama, San Pedro de Atacama, Antártica chilena, Futaleufú y Palena		

Condensación superficial

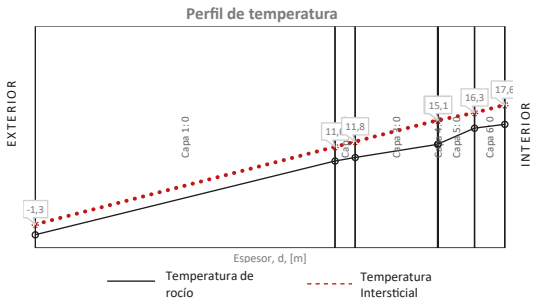
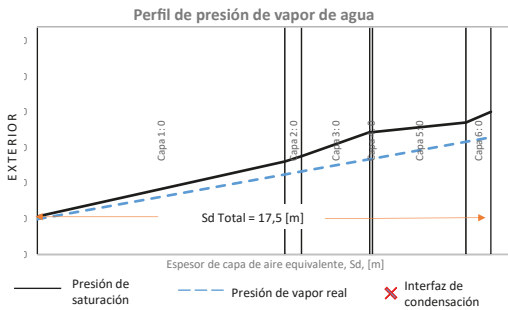
¿Cumple?		Todas las secciones analizadas tienen una resistencia térmica total mayor o igual al mínimo requerido. La condición más estricta para el emplazamiento ocurre en el mes de Julio.
----------	--	---

Condensación intersticial

¿Cumple?		No se predice condensación en ninguna interfaz de ninguna sección.
----------	--	--

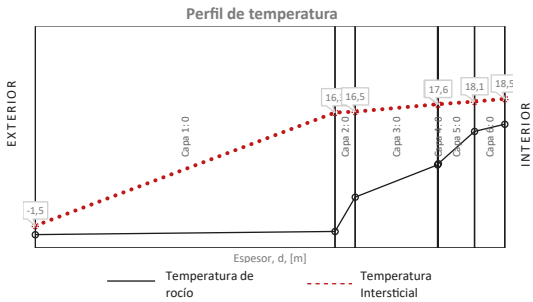
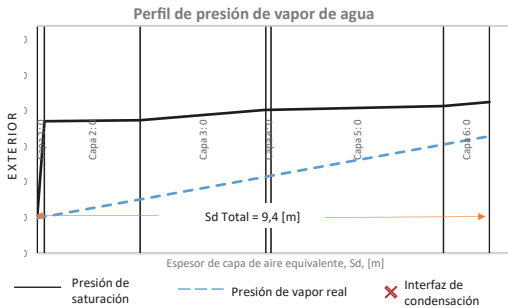
Sección de análisis para gráficos: A MADERA 8X8"

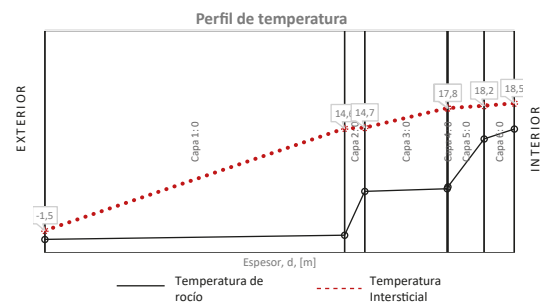
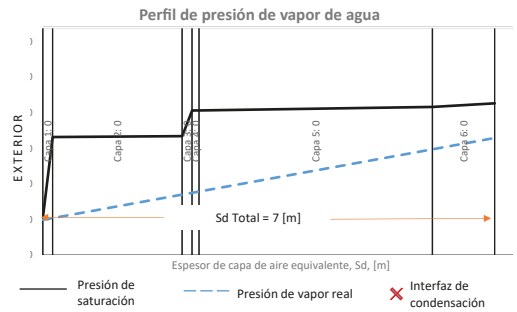
Mes de análisis para gráficos: Julio



Sección de análisis para gráficos: B PINO 2X2"

Mes de análisis para gráficos: Julio





3.3. Hermeticidad y Control de Infiltraciones de Aire.

Para efecto de esta exigencia, la edificación debe cumplir con los estándares de clase de permeabilidad al aire y clase de infiltración al aire.

Con respecto a la clase de permeabilidad al aire de puertas opacas y ventanas, se debe verificar la solución código 3.1.P.M.0.02 para puertas opacas la cual describe una clase de permeabilidad al aire No. 3; y las soluciones código 3.2.V.A.C.1.05, 3.2.V.P.A.0.06, 3.2.V.P.P.0.06, 3.2.V.P.P.3.01 para ventanas las cuales describen clases de permeabilidad al aire No. 3 y 4, todas estas se encuentran sobre las exigencias establecidas en la tabla 9 del DS No. 15 del Minvu. Estos códigos se presentan en el listado oficial de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico del ministerio de vivienda y urbanismo (ED13 - 2025).

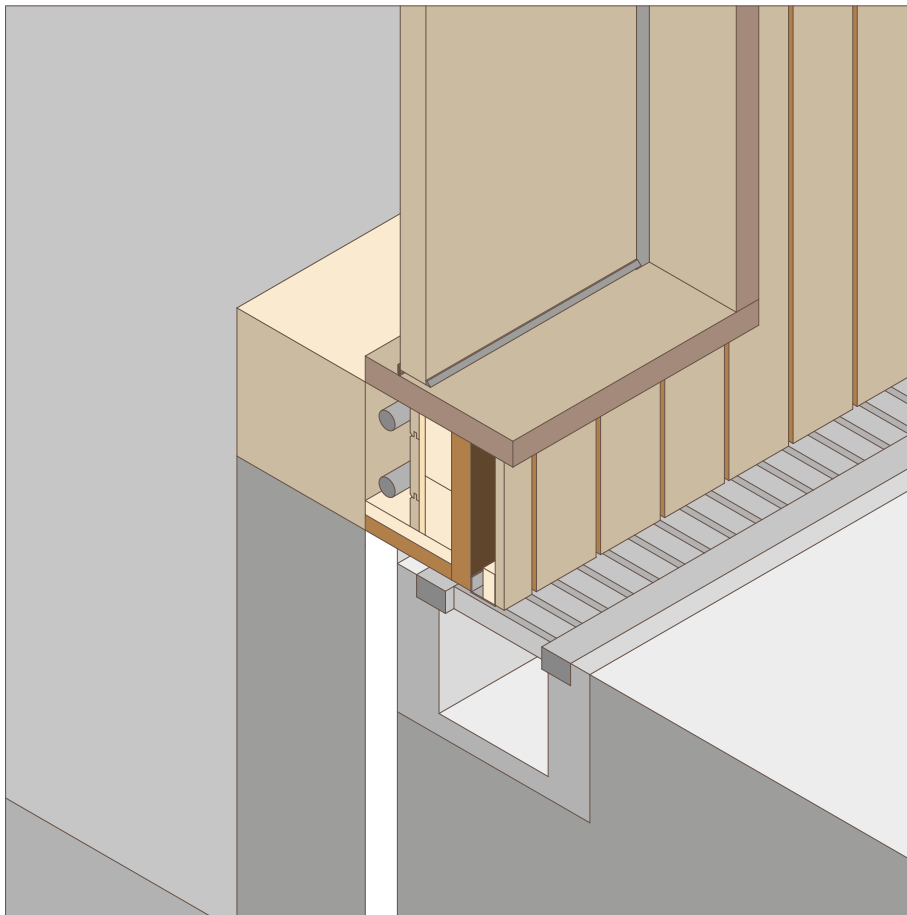
Para verificar la clase de infiltración se debe ejecutar un ensayo en terreno indicado en la NCh 3295 una vez terminada la obra, este describe un método de presurización del volumen interior edificado por medio de un ventilador, ampliamente conocido como Blower Door Test ejecutando una medición de infiltración bajo una diferencia de presión de 50 Pa entre el interior y el exterior. Debido a no contar con la edificación construida para ejecutar este ensayo y la etapa en la cual se encuentra esta investigación, se opta por la alternativa de verificación mediante especificaciones de soluciones constructivas, descritas como la partida de sellos de las especificaciones técnicas que debería contemplar la vivienda y su envolvente.

A continuación, se describen cada una de ellas:

3.3.1. Encuentro entre marcos y vanos de puertas y ventanas.

Encuentro de vano con marco de puerta.

Se instalara un sello elastomérico en base a poliuretano por todo el contorno exterior, en el área de contacto entre el marco de la puerta y el premarco del panel. El sello deberá ser aplicado de forma continua, uniforme mediante una pistola calafatera y su terminación se deberá realizar con una espátula curva. Se instalara burlete de caucho perfil P, burlete de PVC y goma autoadhesiva en todas las puertas que limiten con espacios exteriores o espacios no acondicionados térmicamente. Los burletes se usan para crear un sello hermético en las partes móviles de las puertas, el espesor del burlete de caucho no deberá superar los 5 mm.



Encuentro de vano con marco de ventana.

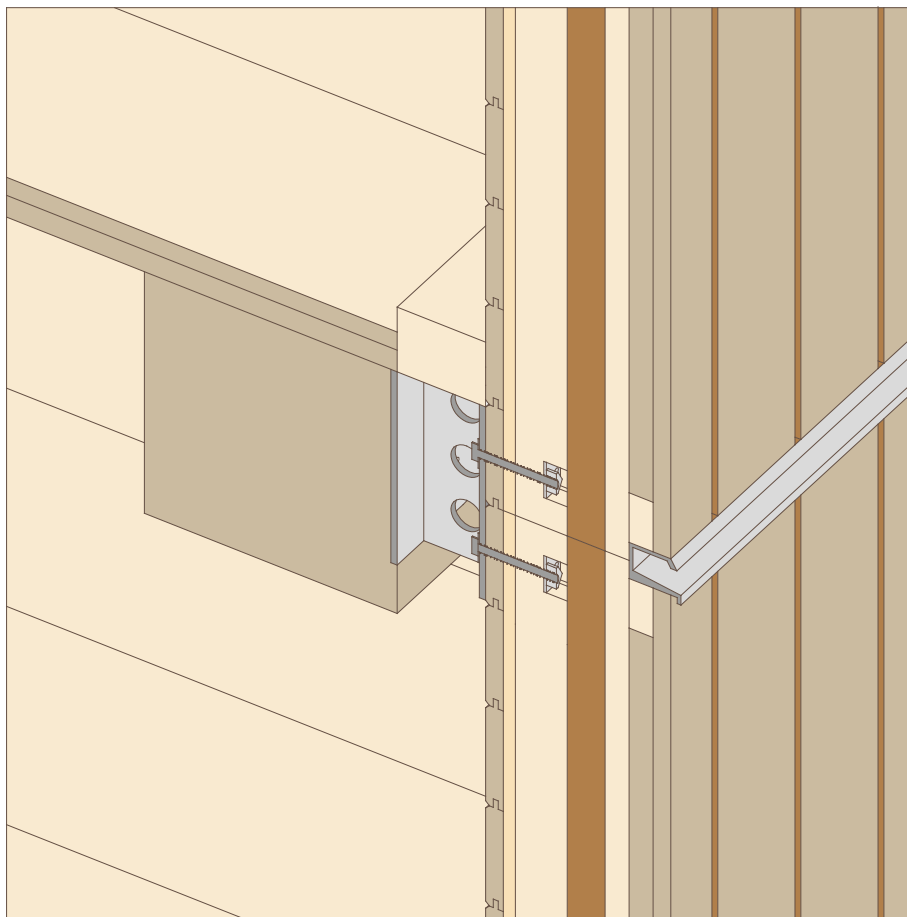
Se considera un sello elastomérico en base a poliuretano por todo el perímetro exterior de cada ventana, toda la zona de contacto entre el marco y el premarco deberá estar limpia, seca sin impregnaciones de aceites o grasas. La instalación de este sello se deberá realizar con una pistola calafateadora de manera continua y uniforme. Para el caso de ventanas abatibles se deberá instalar un burlete perfil P por todo el perímetro del marco interior de la ventana. Finalizado el proceso de instalación de los burletes se procederá la instalación del sello de silicona neutra por la zona interior del premarco, en la zona de contacto con el marco de cada ventana. Este se instalara con una pistola calafateadora, de forma continua y uniforme por todo el perímetro de contacto de estos elementos. El tiempo de fraguado deberá ser el considerado por el fabricante.



3.3.2. Uniones de elementos de distinta materialidad.

Solución de remate con corta gotera entre paneles.

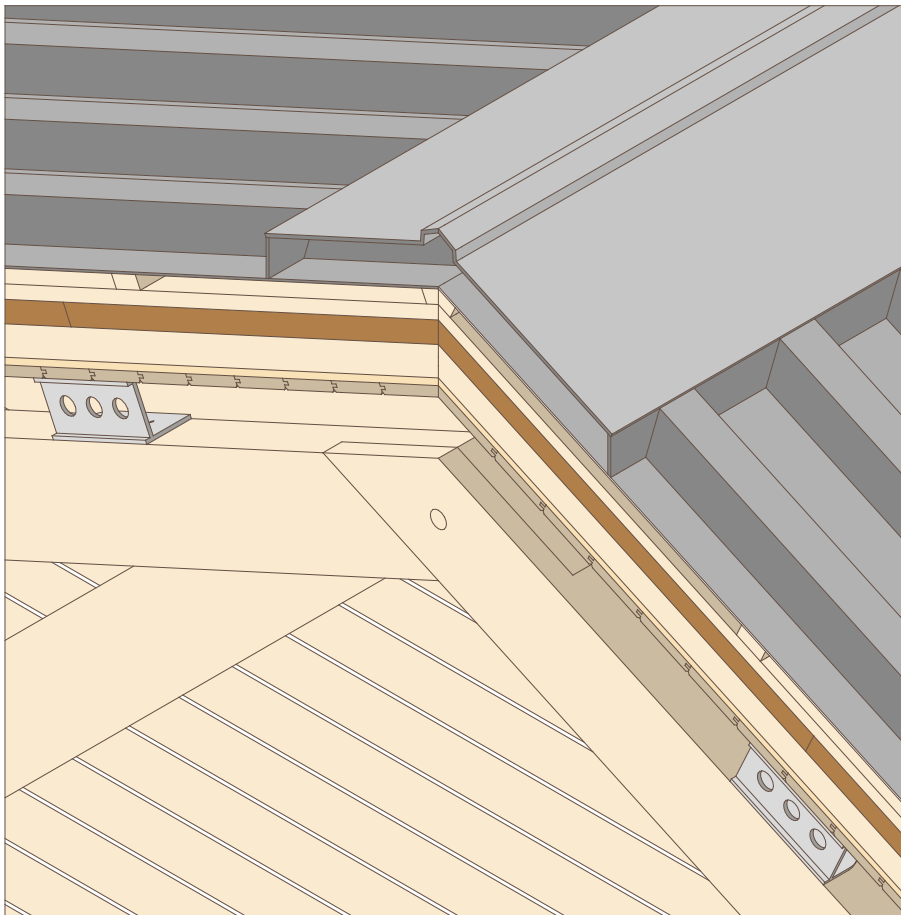
Se instalara un perfil cortagotera en los encuentros verticales entre paneles. Antes de comenzar con la instalacion del perfil, se procederá a realizar una cuidadosa limpieza a todo lo largo de las juntas de dilatación a sellar. En general se deberá aspirar profundamente todo el polvo y suciedad que pueda haber, de tal forma que no se vea disminuida la capacidad de adherencia del material de relleno a aplicar. Este perfil sera adherido conpegamento tipo silicona en el encuentro exterior de la vivienda, rellenando completamente la cavidad entre ambos revestimientos.



3.3.3. Uniones de elementos de una misma materialidad

Encuentro de cumbrera.

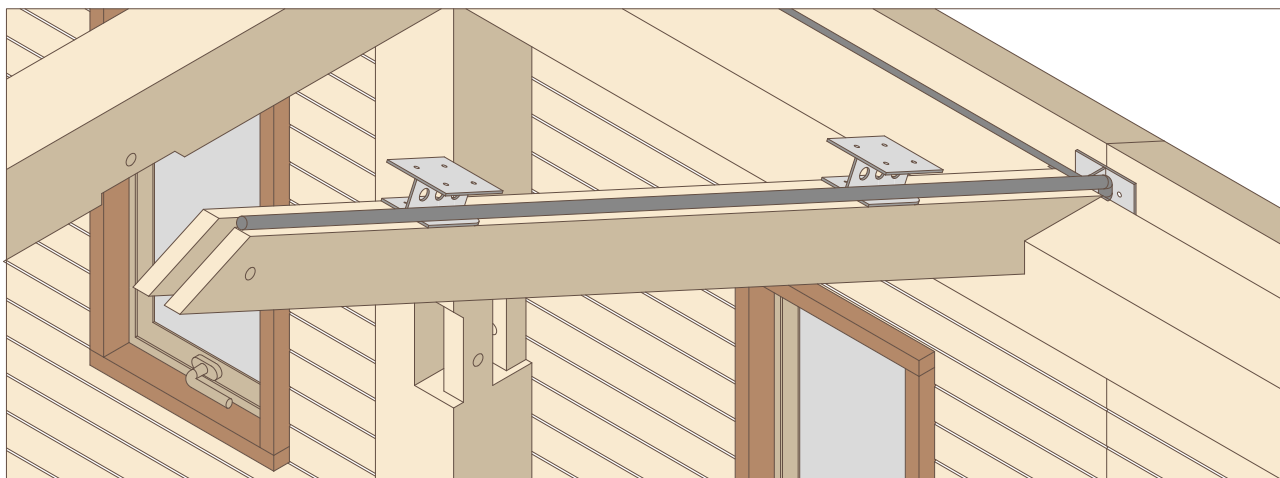
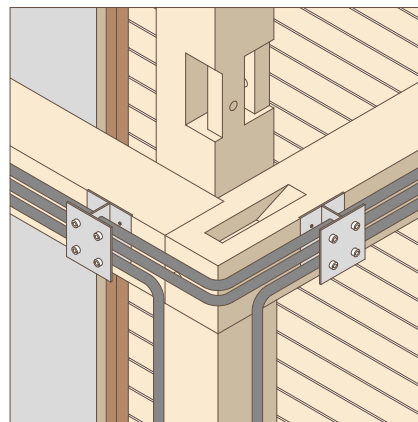
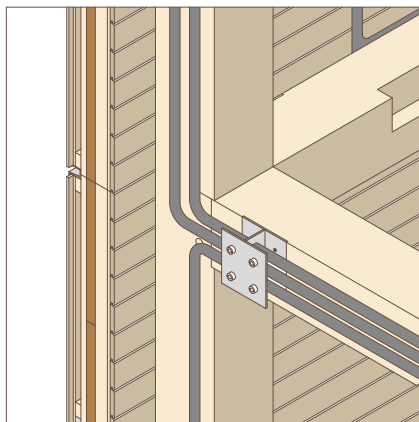
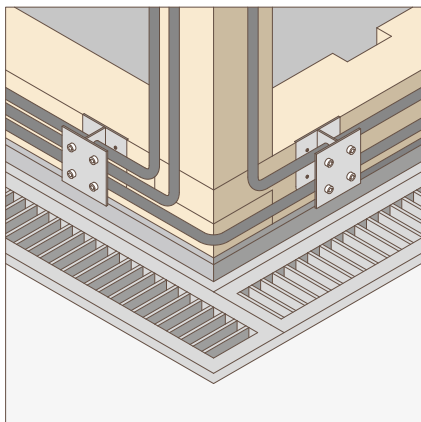
Para el revestimiento de cubiertas se considera una plancha rigidizada mediante trapecios equidistantes en su ancho útil, del tipo CA6 de Arratia, generando un ancho útil de 1,5 m, considerando un traslapo de un trapecio entre planchas. Para su encuentro de cumbrera se fija superiormente una hojalatería sobre las planchas mediante tornillos autoperforantes con golilla y cabeza hexagonal ubicados sobre los montes superiores de la plancha. Se exige un sellado estanco para evitar filtraciones y asegurar la hermeticidad de la cubierta.



3.3.4. Perforación de todas las instalaciones

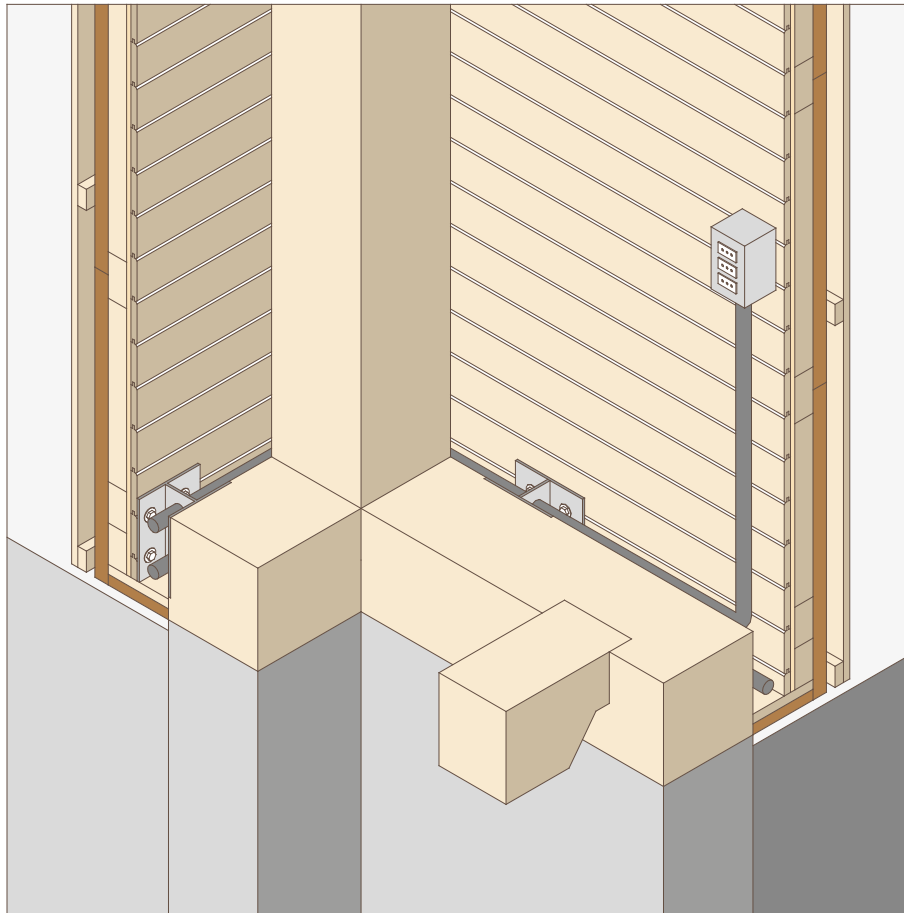
Sistema de canalizaciones.

Se considera el traslado de los ductos de instalaciones en los ejes interiores del alma del conector estructural concéntricamente en sus tres perforaciones. Se propone la utilización de la perforación inferior para recorrer perimetralmente la volumetría general del piso, la perforación central para trasladar las instalaciones a la zona mas alta de la edificación recorriendo las cuatro orientaciones, y la perforación superior para recorrer las bahías y pórticos por pisos del entramado.



Encuentro de revestimiento interior con cajas eléctricas.

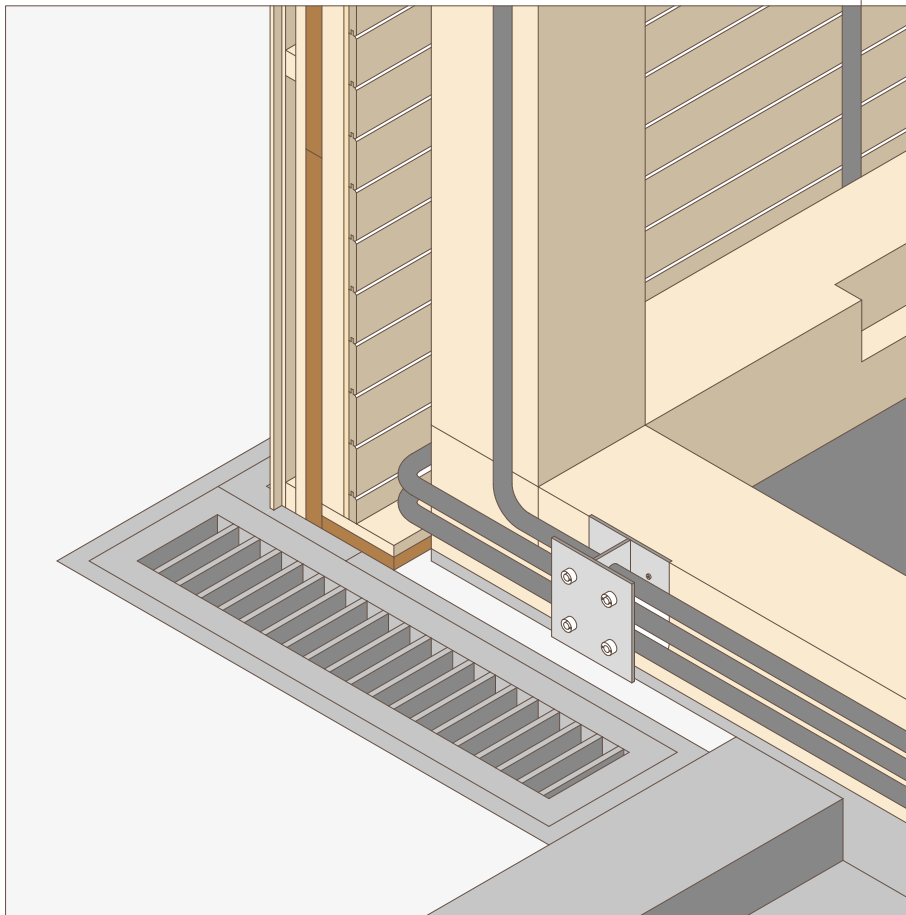
Se considera instalar las cajas de enchufe a una distancia fija de 50 cm medidos linealmente desde el nivel de piso terminado (N.P.T.) hasta el eje de la caja receptor, y las cajas de interruptores a una distancia vertical de 1,00 m desde el nivel de piso terminado (N.P.T.), asegurando estandarización de estos encuentros con la modulación vertical de los paneles. Su fijación se realiza mediante tornillos de rosca gruesa y cabeza troncocónica de N.º 8. Para evitar que la madera se agriete al atornillar, se debe realizar un agujero guía con una broca más delgada que el tornillo a utilizar.



3.3.5. Encuentro de solera inferior con su elemento de soporte

Encuentro entre solera inferior y muro de contención.

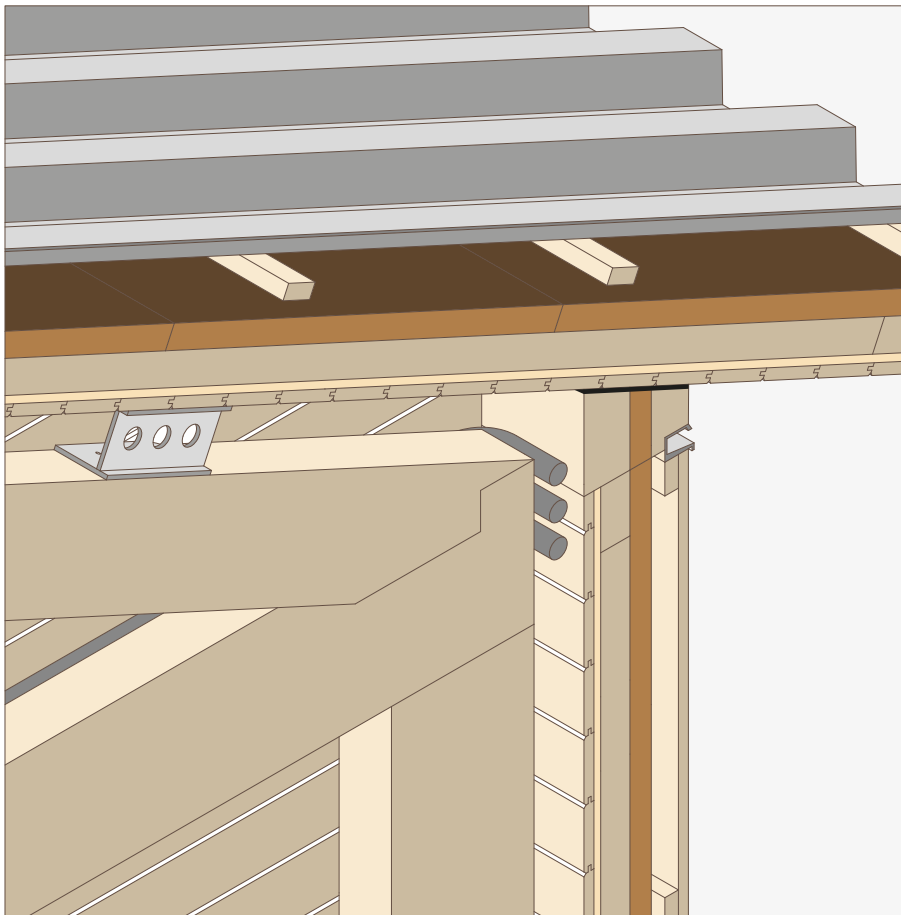
Para el encuentro entre la solera inferior y el muro de hormigón se considera utilizar una masilla de sellado y adhesivo elástico de poliuretano del tipo Sikaflex 1A. Se debe verificar que la superficie de contacto debe estar seca, sana y libre de polvo o grasa para coloca el producto mediante una pistola. Sobre esta masilla se colocarán cintas de sellado expansivas del tipo Compriband mediante espumas de poliuretano precomprimidas para llenar cualquier hueco milimétrico y evitar infiltraciones de aire. Estas soleras se anclarán y apretarán mediante pernos de anclaje redondos con un extremo doblado en forma de "J" con un diámetro mínimo de 15 mm.



3.3.6. Encuentro de solera superior con su elemento de soporte.

Encuentro entre panel de muro y cubierta con alero.

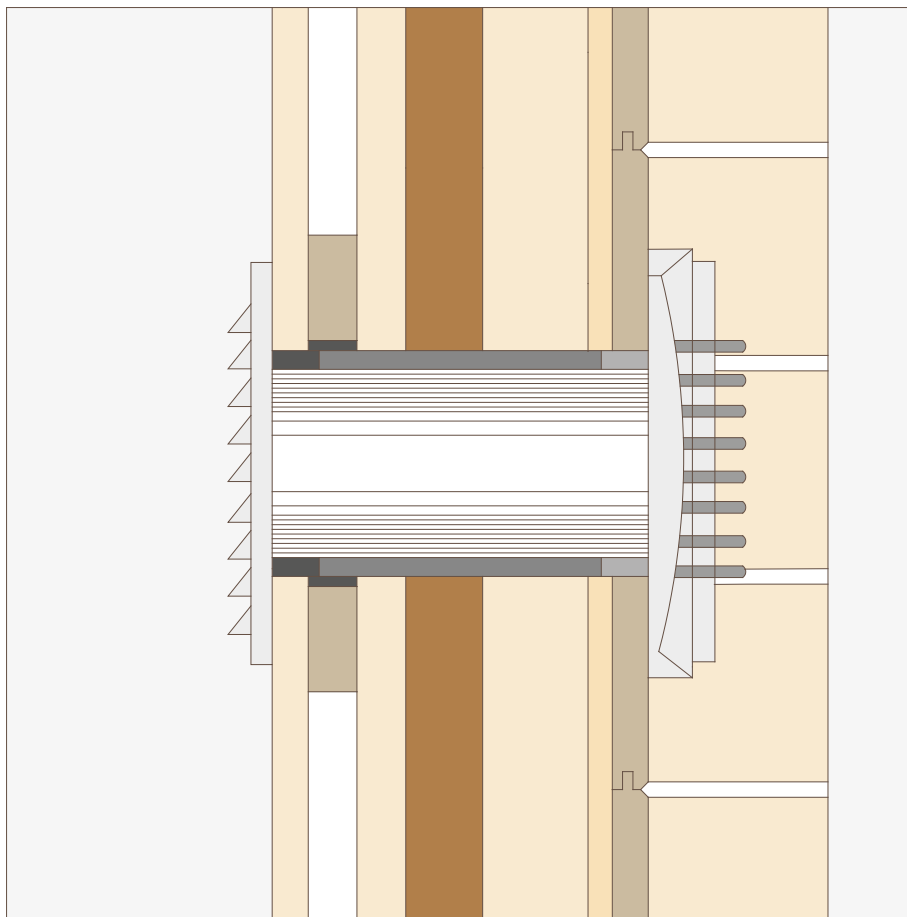
Para el encuentro entre la cara interior del panel de techumbre y el canto del panel superior de segundo piso se considera la instalación de un burlete autoadhesivo de caucho EPDM en base a monómero de etileno propileno dieno entregando un encuentro sintético de alta resistencia mecánica. Se debe asegurar de que la zona esté completamente libre de humedad antes de su instalación.



3.3.7. Dispositivos de ventilación y evacuación de gases.

Traspaso de ductos de ventilación.

Se considera un encamisado al interior de la perforación del panel asegurando la continuidad de la barrera de vapor y barrera de humedad en la zona de contacto con el ducto de la instalación, un sello de poliuretano inyectado en la cara interior del panel ubicado en la zona de contacto entre el revestimiento interior y tubo de instalación, y un sello exterior mediante un cordón elastomérico a base de poliuretano ubicado en la zona de contacto entre el revestimiento exterior y tubo de instalación.



3.4. Ventilación

3.4.1. Sistema híbrido de ventilación a tasas establecidas en NCH 3309.

Se propone un sistema de ventilación continua, donde la extracción local forma parte del sistema de ventilación, de simple flujo, constituido por aberturas de admisión de aire del tipo inyección pasiva instaladas en las fachadas de recintos secos y limpios mediante la cual se realiza el ingreso de aire al interior de la vivienda. La circulación de aire se realiza a través de aberturas de paso interiores y la salida de aire viciado se realiza a través de un sistema mecánico extracción higrorregulable instalado en recintos húmedos.

Componentes del Sistema híbrido de Ventilación.

1. Abertura de admisión pasiva: Se especifica incorporar un sistema genérico de admisión de aire, prefabricado al momento de construir los paneles, mediante ventilas “JONAS 3,5 D Versión Cuadrada” con un paso libre con tyfon y malla mosquitera de 61,7 m², se dispone una ventila para cada recinto seco.



Datos Técnicos	
Capacidad a 10 Pa	7,9 l/s *
Diámetro del producto	Ø85
Paso libre con celosía #150	64 cm²
Paso libre con Tyfon y malla mosquitera	61,7 cm²
Material	Plástico reciclado
Color	Blanco

2. Aberturas de paso: Se deben instalar celosías inferiores en todas las puertas interiores de la vivienda, considerando adicionar un rebaje inferior en estas puertas.

3. Aberturas de extracción mecánica: Se especifica instalar en cada recinto húmedo del tipo baño y cocina un extractor mecánico higroregulable automáticamente con temporizador e higrostatato, se propone el uso de un “RETON 100 BTH de extracción forzada” con una capacidad de extracción de 99 m³/h.



Datos Técnicos	
Modelo	R 100 BTH
Diámetro	Ø100
Voltaje	220-240 V/50 Hz
Capacidad	99 m³/h
Potencia	14 w
Presión	35 Pa
Sonoridad	33 dB(A) 3m
Tipo de carcasa	IPX4, Marca-CE

Descripción de funcionamiento: La admisión de aire desde el exterior se produce por los recintos secos y limpios a través de aberturas de admisión natural de aire. Se entiende por recintos secos y limpios áreas de la vivienda tales como sala de estar, comedor y dormitorios. Luego el aire que ingresa a la vivienda por los recintos secos y limpios debe circular a través de los rebajes y aberturas interiores de cada puertas. Para finalmente, producir la extracción forzada del aire en los recintos húmedos, tales como cocina y baños, por medio de un sistema de extracción mecánica higroregulable de encendido automático que envía el aire viciado hacia el exterior.

Verificación de cumplimiento para sistema híbrido de ventilación
a tasas establecidas en NCH 3309.

INFORMACION VIVIENDA			Requisito de caudal de ventilación en régimen continuo para la vivienda	28	lt/s
Nº Baños	2	cantidad			
Nº Dormitorios	2	cantidad			
Volumen cocina	18	m³			
Superficie útil vivienda	111	m²			

Recinto	Cantidad	Requerimientos Minimos		EETT del proyecto de Ventilación	
		Abertura útil de ingreso de aire (cm²) por cada recinto	Capacidad (lt/s)	Abertura útil de ingreso de aire (cm²)	Capacidad (lt/s)
Dormitorio Principal	1	28	7	61,7	15,425
Dormitorios Simples	1	14	3,5	61,7	15,425
Estar - Comedor	2	35	8,75	61,7	15,425
INGRESO DE AIRE					61,7
COMPROBACION DISPOSITIVOS INGRESO DE AIRE					CUMPLE

Recinto	Cantidad	Requerimientos Minimos		EETT del proyecto de Ventilación	
		Capacidad Requerida por cada de recinto		Capacidad Proyectada por cada recinto	
		lt/s	m3/h	lt/s	m3/h
Cocinas (Extractor)	1	25	90	28	99
Baños (Extractor)	2	10	36	28	99
EXTRACCIÓN DE AIRE					297
COMPROBACION EQUIPOS PARA EXTRACCIÓN DE AIRE					CUMPLE

Conclusión

El desarrollo de este proyecto de titulación consolida una respuesta técnica y científica viable frente a los nuevos y exigentes desafíos de la física de la construcción en Chile. Ante la entrada en vigor del Decreto Supremo No. 15 que redefine los estándares térmicos, esta investigación cumple con éxito el objetivo general al diseñar y validar una nueva opción de envolvente higrotérmica compuesta por paneles modulares autoportantes.

Esta propuesta despliega una solución integral para los complejos de techumbre, muros perimetrales, puertas opacas y ventanas, superando las limitaciones de las soluciones tradicionales y abriendo el espectro tecnológico para las edificaciones residenciales estructuradas mediante pórticos y entramado pesado de madera.

Los resultados de la investigación permiten concluir el cumplimiento riguroso de las metas específicas planteadas:

Modularidad (OE 1): Se logró desarrollar un sistema constructivo modular para la envolvente que responde con flexibilidad y continuidad térmica ante las características de la estructura principal. El diseño demostró una alta capacidad de adaptación e integración técnica al interactuar con los componentes horizontales del entramado pesado, garantizando la estabilidad del sistema y la resolución eficiente de los encuentros.

Validación Normativa y Desempeño Higrotérmico (OE 2): Mediante análisis predictivos y de comportamientos de flujos, se validó el cumplimiento técnico y normativo de los paneles autoportantes bajo el marco higrotérmico regulatorio más estricto del país. Los análisis demostraron que la configuración propuesta optimiza y controla el gradiente de presiones de vapor interior en los diferentes estratos constructivos, mitigando por completo el riesgo de condensación superficial e intersticial para las extremas condiciones de la macrozona H-I.

La principal oportunidad identificada en este trabajo radica en su lógica de estandarización y potencial de industrialización. La envolvente se concibe desde el origen como un sistema de componentes parametrizables aptos para la prefabricación en fábrica, lo que optimiza los recursos y disminuye drásticamente la existencia potencial de puentes térmicos.

En síntesis, esta investigación transita con éxito desde la teoría hacia el desarrollo tecnológico. El marco metodológico establecido deja sentadas las bases para una futura fase de validación empírica mediante la construcción y monitoreo de un prototipo a escala real, permitiendo contrastar los datos experimentales in situ con los modelos teóricos aquí presentados, consolidando así una alternativa constructiva madura, eficiente y científicamente respaldada para el mercado residencial.

La metodología y los resultados obtenidos en esta investigación sientan las bases técnicas y científicas para el diseño de la envolvente modular autoportante. No obstante, la complejidad inherente a la física de la construcción y los procesos de industrialización abren nuevas interrogantes y oportunidades de desarrollo.

A continuación, se proponen las líneas de investigación futuras destinadas a profundizar, validar y expandir los alcances de la presente propuesta:

1. Validación Empírica y Monitoreo Higrotérmico.

La primera línea de desarrollo crítico corresponde a la transición desde el modelado predictivo digital hacia la verificación empírica. Se propone la construcción de un prototipo a escala real como módulo experimental de la envolvente propuesta, emplazado en un entorno climático simulado para de la macrozona térmica H-I. Este módulo deberá ser instrumentado con sensores mediante cámaras volumétricas para estudiar la temperatura superficial e intersticial de los estratos propuestos. El monitoreo continuo durante un ciclo estacional propuesto permitirá contrastar las tasas de transmitancia térmica reales frente a los valores teóricos calculados bajo las normas chilenas. Junto a esto se podrá verificar la efectividad de las barreras de vapor e hidrofuga ante fenómenos de condensación en periodos de alta demanda térmica.

2. Optimización de Vinculación Estructural.

Si bien este proyecto define arquitectónica y conceptualmente la vinculación de la envolvente modular con la estructura porticada, se requiere un desarrollo de ingeniería de detalle para los puntos de encuentro. El trabajo futuro debe evaluar las concentraciones de esfuerzos mecánicos y las solicitaciones sísmicas en los anclajes. Asimismo, se debe estudiar bidimensionalmente el puente térmico crítico del encuentro, identificando la idoneidad material del componente, garantizando un correcto comportamiento higrotérmico.

3. Fabricación e Industrialización.

El carácter modular y estandarizado de la propuesta técnica abre las puertas hacia la arquitectura para la fabricación y el ensamblaje. Una línea de investigación futura relevante es el desarrollo de la ingeniería de manufactura del panel, definiendo las tolerancias milimétricas de corte, los sistemas de encastre macho-hembra entre módulos y la optimización de la cadena de montaje en taller mediante herramientas de programación paramétrica. Esto asegurará que el paso del diseño digital a la prefabricación robotizada o automatizada mantenga la estanqueidad al aire y la continuidad del aislamiento térmico proyectado.

Referencias

Libros

- SOBON, Jack A y SCHROEDER, Roger. Construcción con estructura de madera, Todo sobre la construcción con postes y vigas. Vermont, EE. UU, Garden Way Publishing, 1984. 208 p.
- SOBON, Jack A. Construye una casa clásica con estructura de madera. Vermont, EE. UU, Storey Publishing, 1994. 208 p
- SOBON, Jack A. Carpintería histórica estadounidense: Una guía gráfica. 2a. ed. Massachusetts, EE. UU, Timber Framers Guild, 2004, 54 p.
- SOBON, Jack A. Tallado a mano: Las tradiciones, las herramientas y la belleza perdurable de las estructuras de madera. Massachusetts, EE. UU, Storey Publishing, 2019. 272 p.
- BEEMER, Will y SOBON Jack A. Aprenda a construir estructuras de madera. Massachusetts, EE. UU, Storey Publishing LLC, 2016, 192 p.
- BENSON, Tedd. La casa con estructura de madera. Diseño Construcción Acabados. Connecticut, EE. UU., Taunton Press, 1997, 238 p.
- PERAZA SÁNCHEZ José Enrique. Casas de madera: Los sistemas constructivos a base de madera aplicados a las viviendas unifamiliares. Madrid, España, AITIM (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho), 1995, 699 p.
- GONZÁLEZ BÖHME Luis Felipe y MAINO ANSALDO Sandro. Uniones carpinteras de Valparaíso. La geometría de ensambles y empalmes. Santiago, Chile, RIL Editores, 2019, 156 p.

Ley

- Ley N° 458. Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC). DFL N° 458 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Diario Oficial de la República de Chile. 13 de abril de 1976. 600 p.

Normas

- Instituto Nacional de Normalización (INN). Arquitectura y construcción - Zonificación climática y térmica para el diseño de edificaciones. NCh1079:2022. Santiago, Chile. 2022. 50 p.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). Aislación térmica - Materiales y elementos de construcción - Resistencia térmica. NCh 2251:2010. Santiago, Chile. 2010. 54 p.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). Aislación térmica - Determinación de propiedades de transmisión térmica en estado estacionario - Método de la caja caliente protegida. NCh 851:2008. Santiago, Chile. 2008. 25 p.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). Acondicionamiento térmico - Parte 1: Especificaciones técnicas de diseño para viviendas. NCh 3076/1:2008. Santiago, Chile. 2008. 12 p.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). Comportamiento térmico de puertas y ventanas - Cálculo de la transmitancia térmica - Parte 2: Método numérico para marcos. NCh 3076/2:2008. Santiago, Chile. 2008. 13 p.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). Componentes y elementos para edificación - Resistencia térmica y transmitancia térmica - Métodos de cálculo. NCh 853:2021. Santiago, Chile. 2021. 34 p.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). Comportamiento térmico de edificios - Transmisión de calor por el terreno - Métodos de cálculo. NCh 3117:2008. Santiago, Chile. 2008. 50 p.

- Instituto Nacional de Normalización (INN). Aislamiento térmico - Cálculo de transmitancia térmica - Parte 1: Componentes opacos. NCh 3137/1:2010. Santiago, Chile. 2010. 27 p.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). Aislamiento térmico - Cálculo de transmitancia térmica - Parte 2: Componentes vidriados. NCh 3137/2:2010. Santiago, Chile. 2010. 30 p.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). Comportamiento higrotérmico de elementos y componentes de construcción - Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial - Métodos de cálculo. NCh1973:2014. Santiago, Chile. 2014. 25 p.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). Ventilación - Calidad aceptable de aire interior – Requisitos. NCh 3308:2024. Santiago, Chile. 2024. 33 p.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). Ventilación - Calidad de aire interior aceptable en edificios residenciales de baja altura. NCh 3309:2014. Santiago, Chile. 2014. 21 p.

A. Elaboración de Prototipo

Se ejecuta un prototipo de envoltorio a escala 1:13 mediante impresión 3D con filamento Bambú Lab PLA Wood (Madera), mezcla de alta calidad con polvo de madera fino para darle una apariencia y textura realista similar a la madera, obteniendo una textura suave pero ligeramente granulada. Se utiliza el tono Classic Birch (Abedul Clásico).

