



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía



Qué posibilidad tienen las viviendas industrializadas en madera de mediana altura en contribuir a la economía circular en la construcción

POR

Felipe Andrés Espinoza Norambuena

Trabajo Integrativo presentado a la Facultad de Ingeniería &
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía de la Universidad de Concepción
para optar al grado académico de
Magíster en Construcción Industrializada en Madera

Profesor Guía: Alejandro J. Lara San Martín

Profesor Co-Guía: Nicolás Pérez Fernández

Marzo de 2025
Concepción, Chile

© 2025 Felipe Andrés Espinoza Norambuena

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

La investigación aborda la problemática de la sostenibilidad y economía circular en el sector construcción en Chile, específicamente en viviendas industrializadas de madera de mediana altura, donde existe una brecha significativa en la implementación de principios de diseño para el desmontaje y adaptabilidad (en adelante DfD/A). Este concepto del DfD/A se considera como un diseño que pretende maximizar la conservación de los materiales en consideración a la gestión del final del servicio. Los edificios diseñados para el desmontaje son adaptables y esta estrategia evita la demolición, además, permite diseñar edificios que se puedan modificar en el futuro y, en última instancia, desmontar (en parte o en su totalidad) para la recuperación de componentes y materiales con el objetivo de cambiar lo que se viene desarrollando de economía lineal por economía circular.

El estudio se centra en el Proyecto Vivienda industrializada DS49 - Lo Espejo, primera vivienda social modular industrializada en madera en Chile, evaluando su potencial contribución a la economía circular. El objetivo general es analizar la contribución de las viviendas industrializadas en madera de mediana altura a la economía circular en la construcción, mediante el estudio de sus características técnicas, impacto ambiental y estrategias de desmontaje y reutilización. Los objetivos específicos comprenden: identificar las características técnicas y constructivas que faciliten el desmontaje y reutilización, y determinar criterios de desmontaje según normativas y estándares internacionales que son base de esta investigación como la UNE-ISO 20887:2023 - Sostenibilidad en edificación y obras de ingeniería civil: diseño para desmontaje y adaptabilidad (Organización Internacional de Estandarización, 2023) (en adelante ISO-20887). Para Chile, se complementa con la información de la “Hoja de ruta para un Chile circular al 2040” elaborada por el Ministerio del medio ambiente (2021) (en adelante MMA) que resulta ser similar a lo proyectado en Canadá mediante el informe final “Economía Circular y el entorno construido sector Canadá” (The Delphi Group, 2021). La metodología empleada es cualitativa descriptiva, incluyendo visitas a terreno para observación directa, análisis planimétrico de documentación técnica, y evaluación comparativa mediante matriz de evaluación de viabilidad basadas en la normativa internacional ISO-20887 que se considera como un estándar vinculante a las normativas nacionales.

El estudio concluye que existe una brecha significativa entre las prácticas actuales en Chile y los estándares internacionales de construcción circular, identificando oportunidades de mejora como la implementación de conexiones reversibles, desarrollo de sistemas modulares estandarizados, y planificación integral del ciclo de vida del edificio.

PALABRAS CLAVES

Construcción industrializada, Estructura en madera, diseño para el desmontaje, economía circular, vivienda social.

ABSTRACT

This research addresses the issue of sustainability and circular economy in the construction sector in Chile, specifically in mid-rise industrialized wooden housing, where there is a significant gap in the implementation of Design for Disassembly and Adaptability (hereinafter DfD/A) principles. The DfD/A concept is considered a design approach aimed at maximizing material conservation while taking end-of-life management into account. Buildings designed for disassembly are adaptable, preventing demolition and allowing for future modifications and, ultimately, disassembly (partially or entirely) for the recovery of components and materials with the aim of shifting from a linear economy to a circular economy.

The study focuses on the DS49 Industrialized Housing Project - Lo Espejo, the first modular social housing project built with wood in Chile, evaluating its potential contribution to the circular economy. The main objective is to analyze the contribution of mid-rise industrialized wooden housing to the circular economy in construction by studying its technical characteristics, environmental impact, and disassembly and reuse strategies. The specific objectives include: identifying technical and construction features that facilitate disassembly and reuse and determining disassembly criteria based on international regulations and standards that form the basis of this research, such as UNE-ISO 20887:2023 - Sustainability in buildings and civil engineering works: Design for disassembly and adaptability (International Organization for Standardization, 2023) (hereinafter ISO-20887). For Chile, this is complemented by information from the "Roadmap for a Circular Chile by 2040", developed by the Ministry of the Environment (2021) (hereinafter MMA), which aligns with the strategies projected in Canada through the Final Report on "Circular Economy and the Built Environment Sector" (The Delphi Group, 2021).

The methodology used is qualitative and descriptive, including field visits for direct observation, a planimetric analysis of technical documentation, and a comparative evaluation through a feasibility assessment matrix based on the international ISO-20887 standard, which is considered a binding reference for national regulations.

The study concludes that there is a significant gap between current practices in Chile and international circular construction standards, identifying opportunities for improvement such as the implementation of reversible connections, the development of standardized modular systems, and the comprehensive planning of the building's life cycle.

KEYWORDS

Industrialized construction, Wooden structure, Design for disassembly, Circular economy, social housing.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción sostenible y la economía circular han emergido como pilares fundamentales para enfrentar los desafíos ambientales y sociales del siglo XXI. En este contexto, las viviendas industrializadas en madera de mediana altura representan una oportunidad única para transformar el sector de la construcción, tradicionalmente lineal, según lo indicado en “Hoja de Ruta para un Chile Circular 2040” (en adelante HR Chile 2040), reemplazando lo que se viene realizando en términos de “extraer-producir-consumir-desechar”, hacia un modelo más circular y eficiente que ofrezca una alternativa que busca emular este modelo tradicional en un modelo más virtuoso de funcionamiento en los sistemas económicos. La crisis climática y la gestión de residuos representan dos de los mayores desafíos que enfrenta el sector de la construcción en el siglo XXI. Como señala el autor Paul Bannen en su libro "How Wood Can Help Save the World from Climate Breakdown" (2024), la construcción en madera emerge como una solución prometedora para reducir las emisiones de carbono y promover una economía más circular. En Chile, en el libro “La Construcción de Viviendas en Madera en Chile” del Banco Mundial (2020), el sector construcción genera aproximadamente el 34% de los residuos sólidos del país, en este contexto, resulta fundamental el avanzar en proceso de construcción industrializados con mayor calidad y que hagan uso de materiales sustentables de alta calidad como lo es la madera. La presente investigación analiza las posibilidades que tienen las viviendas industrializadas en madera de mediana altura de contribuir a la economía circular en el sector de la construcción en Chile, mediante la implementación de principios de diseño DfD/A, a través del análisis realizado al Proyecto Vivienda Industrializada DS49 - Lo Espejo (en adelante proyecto), se busca identificar las brechas entre las prácticas actuales en Chile en comparación con los estándares internacionales, proponiendo estrategias para mejorar la sostenibilidad, la documentación y la circularidad en la construcción. (ver imagen 1)

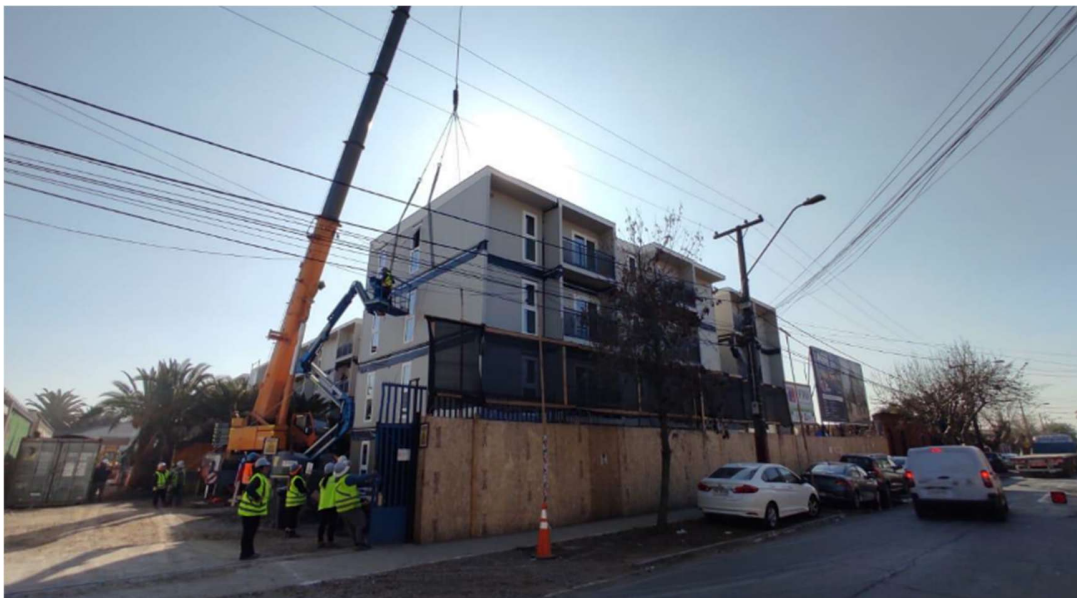


Imagen 1 - Fachada Proyecto Vivienda Industrializada DS49 – Comuna de Lo Espejo. Fuente: Elaboración Propia

5

La génesis de este proyecto que se adjudicó en la licitación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (en adelante Minvu), corresponde a un consorcio conformado por las empresas socias del Consejo de Construcción Industrializada (CCI) : Archiplan, Tecnofast y Entidad Patrocinante Unión, para el diseño y construcción de viviendas sociales en Lo Espejo, siendo la Constructora Vive la encargada de la construcción y montaje. El proyecto está conformado por estructuras de madera en entramado ligero, en una integración entre piezas y paneles, que dan como resultado dos módulos construidos en un ambiente controlado, los que están diseñados para ser dispuestos de forma adosada tanto en planta como en altura, generando un edificio de unidades habitacionales de cuatro pisos. Cada departamento se compone de dos o tres módulos que en su conjunto conforman tres tipos de departamentos (tres dormitorios, dos dormitorios y uno habilitado para movilidad reducida) y las superficies varían entre 55 m² y 61 m² aproximadamente según la tipología de diseño. El proyecto responde a una tipología constructiva modular, con uso de alta tecnología, lo que permite una importante reducción de efectos contaminantes ya que son fabricadas en una planta especializada, lo que también ayuda a mejorar los tiempos de edificación y entrega.

Estas viviendas industrializadas están diseñadas para ser construidas a través de subsidios del Estado, mediante el Fondo Solidario de Elección de Vivienda DS49 (en adelante DS49) en la modalidad de CNT*. Cuentan con 3 dormitorios, living, comedor, logia y baño con los estándares exigidos por el DS49. El objetivo principal era el desarrollo de viviendas sociales a través del subsidio, utilizando un sistema industrializado en entramado ligero con estructura en madera. Esta iniciativa innovadora y desafiante, por ser la primera en este tipo, que buscaba acelerar la entrega de viviendas sociales mediante la optimización de los tiempos de fabricación en planta y la minimización de los periodos de montaje en obra con tecnologías bajas en emisiones de carbono, todo ello bajo el programa de “Plan de Emergencia Habitacional” (en adelante PEH), como parte de una estrategia para enfrentar la escasez de viviendas que afecta a cientos de miles de familias en Chile. Dicho PEH liderado por el Minvu, tiene como una de sus prioridades crear herramientas efectivas para modernizar los procesos constructivos. En ese contexto, a través del proceso de vivienda industrializada se ha buscado construir en menor tiempo y con tecnologías bajas en emisiones de carbono. Para llevar a cabo esta investigación se utilizó la metodología de evaluación de viabilidad y comprobación basada en los criterios establecidos por el estándar internacional ISO-20887 que proporciona una descripción general de los principios de diseño para el desmontaje y la adaptabilidad. En función de estas directrices, se realizó un análisis comparativo mediante la matriz de evaluación de viabilidad que revela un panorama mixto en términos de adaptabilidad y desmontaje para opciones de elementos y componentes para cada principio del DfD/A. La experiencia internacional, particularmente el caso del Campus Hambaken en los Países Bajos (Rothoblaas, 2024) y las soluciones técnicas utilizadas por la compañía italiana Rothoblaas, demuestra que es posible implementar sistemas constructivos que faciliten el desmontaje y la reutilización y proporcionan ejemplos concretos de cómo la construcción en madera puede incorporar principios de economía circular desde el diseño inicial.

2. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

a. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN/ HIPÓTESIS

Preguntas:

¿En qué medida el diseño constructivo del proyecto Lo Espejo incorpora principios de desmontaje y adaptabilidad que contribuyan a la economía circular y la reducción de la huella de carbono, según los estándares internacionales establecidos por la norma ISO-20887?

¿Cuáles son las brechas y oportunidades en el diseño para el desmontaje del proyecto, considerando los estándares internacionales y cómo podrían fundamentar una propuesta normativa para Chile?

¿De qué manera las viviendas industrializadas en madera de mediana altura en Chile contribuyen en la economía circular en la construcción?

Hipótesis:

La aplicación de criterios DfD/A basados en ISO-20887 al proyecto establecerá lineamientos para viviendas industrializadas en madera más sostenibles en Chile, evaluando su potencial de desmontaje y adaptabilidad para futuras normativas nacionales de construcción circular

b. OBJETIVOS

✓ **Objetivo General:**

- Analizar la contribución de las viviendas industrializadas en madera de mediana altura, en la economía circular en la construcción (mediante el estudio de sus características técnicas, impacto ambiental y estrategias de desmontaje y reutilización por medio de la comparación de normativas internacionales que permitan obtener recomendaciones y conclusiones para los proyectos modulares en Chile.

✓ **Objetivo Específicos:**

- Identificar las características técnicas y constructivas de las viviendas industrializadas en madera de mediana altura que faciliten su desmontaje y reutilización, a través de un análisis planimétrico y de observación en terreno, considerando para esta investigación el caso proyecto.
- Determinar criterios de desmontaje y adaptabilidad (DfD/A) según normativa internacional ISO-20887 aplicados al Proyecto de Investigación.

c. DISEÑO METODOLÓGICO

Esta investigación adopta un enfoque metodológico cualitativo descriptivo, para abordar el estudio de la contribución de las viviendas industrializadas en madera de mediana altura, en la economía circular en la construcción, asociados al proyecto. El enfoque general se basa en la revisión documental, la observación en terreno y el análisis planimétrico.

✓ **Primer Objetivo Específico: Identificación de Características Técnicas y Constructivas**

Para lograr este objetivo, se emplearon los siguientes métodos:

- 1. Visitas a Terreno:** En primera instancia, se realizó una visita a la dirección Astaburuaga en la comuna de Lo Espejo, donde se estableció contacto con el jefe de obra, el cual amablemente proporcionó una breve explicación del proyecto en las afueras de la obra. El acceso al interior no fue posible inicialmente debido a maniobras en curso y la necesidad de finalizar esas actividades con premura. Sin embargo, se consultó al encargado de obra la factibilidad de realizar un recorrido planificado para no interferir con las labores diarias, el cual accedió y se programó para dos semanas posteriores una visita dirigida al proyecto. En una segunda instancia, se logró el ingreso y se inspeccionaron los cuatro edificios que componen el proyecto. El propósito fue observar directamente las características constructivas, los sistemas de fijación, la secuencia de montaje y las estrategias constructivas utilizadas. Además, se inspeccionó el departamento piloto y se observó un departamento en etapa de terminaciones, lo que permitió reflejar el estado del arte del proyecto en su totalidad. Para respaldar la información obtenida, se realizaron notas de campo que describieron los apuntes, características, y todos los detalles constructivos relevantes del proyecto producto de esta visita guiada. Adicionalmente se consideró realizar levantamiento fotográfico respecto a los detalles constructivos, detalle de fijaciones y tipos de herrajes, los interiores de departamentos, las informaciones relacionadas con la metodología de unión de módulos y explanada general del proyecto.
- 2. Análisis Planimétrico:** A través de contactos con la dirección del proyecto de la empresa Archiplan, se facilitaron algunos planos de arquitectura y elevaciones. Estos fueron estudiados detalladamente para identificar las características técnicas y constructivas, incluyendo la estructura, los materiales y las dimensiones. No se logró disponer de planos de estructura y montaje. Sin embargo, durante la visita a la obra en conjunto con el jefe de obra, se revisaron los planos para identificar la distribución de espacios, las dimensiones de los módulos y los detalles constructivos, con el propósito de poder entender e identificar los detalles constructivos de unión y montaje de los módulos que conforman los diferentes tipos de departamentos.

3. Análisis Documental: Se revisaron antecedentes técnicos, información documental y presentaciones del proyecto, tanto en la Semana de la Madera 2024 como en el VII Seminario de Vivienda Sustentable realizado en el centro Gabriela Mistral de Santiago de Chile (en adelante GAM) en noviembre del 2024. Esto incluyó especificaciones técnicas de los sistemas de fijación, la secuencia de montaje de las fijaciones y las estrategias constructivas para el montaje de módulos. Se analizó la información facilitada por los responsables del proyecto. Adicionalmente, se visualizaron videos y time-lapse en la plataforma YouTube, proporcionados por las empresas Tecnofast y la Constructora Vive.

4. Diferenciación de Componentes: Se identificaron los componentes prefabricados en taller (estructura principal y secundaria en madera entramado ligero) y los trabajos realizados in situ (pinturas, instalación de cocina, terminaciones o “costuras” de unión de módulos). Esto permitió dimensionar el grado de industrialización del proyecto y sus trascendencias para el desmontaje.

✓ **Segundo Objetivo Específico: Determinar criterios de desmontaje y adaptabilidad (DfD/A) según normativa internacional.**

Para este objetivo, se utilizaron los siguientes métodos:

- 1. Análisis de Normativas:** Se analizaron las normas internacionales relacionadas con el desmontaje y adaptabilidad ISO-20887, considerando la matriz de evaluación de viabilidad como métrica de control aplicada al proyecto y a nivel nacional la Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2024, que es una estrategia desarrollada por el gobierno de Chile para promover la transición hacia una economía circular en el país. Su objetivo es reducir la generación de residuos, optimizar el uso de recursos y fomentar modelos de producción y consumo sostenibles. Se consideró el análisis de los documentos desarrollados por CDT relacionados con la estrategia e introducción a la economía circular en Chile. Complementariamente se revisó información de Canadá mediante el estándar CSA Z-782-06 – “Guideline for Design for Disassembly and Adaptability in building” (similar a la norma ISO-20887) asociada al concepto del DfD/A.
- 2. Análisis Comparativo:** Se analizó las características técnicas y constructivas del proyecto comparándolo con los criterios de la norma ISO-20887 para identificar las brechas entre el diseño actual y los requisitos para el desmontaje y la adaptabilidad indicados como requisitos para cada proyecto. A partir de esta normativa se elaboró una matriz de verificación de viabilidad que incorpora las características de desmontaje y adaptabilidad que deben cumplir los proyectos (ver Tablas N° 1-2-3).

3. RESULTADOS

La investigación se centra en dos objetivos principales: analizar las características técnicas de viviendas industrializadas modulares en madera y, evaluar criterios de desmontabilidad según normativas internacionales. El proyecto enfrentó varios desafíos significativos en su implementación desde la integración temprana entre los involucrados e industrialización. En primer lugar, ninguna de las entidades participantes tenía experiencia previa en viviendas sociales industrializadas para DS49 con sistema modular en madera, lo que requirió una pronunciada curva de aprendizaje e innovación constante. El sistema modular impuso limitaciones dimensionales para transporte y montaje, exigiendo una planificación meticulosa y coordinación precisa entre equipos, afectando directamente la configuración espacial y constructiva. Adicionalmente, el proyecto debía cumplir con especificaciones estrictas en distribución de espacios, mobiliario, estacionamientos y otros elementos propios de la vivienda social, añadiendo complejidad al diseño modular. Por último, la ausencia de un Plan de Descontaminación Atmosférica (en adelante PDA) vigente en la Región Metropolitana durante la licitación obligó a buscar soluciones técnicas alternativas y cumplir con restricciones específicas en vanos y orientaciones de muros. Estos desafíos consideraron adaptación continua y soluciones innovadoras, demostrando la complejidad de implementar sistemas modulares en madera para vivienda social.

3.1 Identificar las características técnicas y constructivas de las viviendas industrializadas en madera de mediana altura:

3.1.1 Emplazamiento

3.1.1.1 Ubicación Proyecto: está emplazado en Barrio Pueblo de Lo Espejo, (ver imagen 2) calle Astaburuaga #9371 comuna de Lo Espejo, en un antiguo galpón de fábrica de pinturas, donde se tuvo que demoler por completo, resguardando la vegetación existente como parte del proyecto fue considerarlas dentro de las áreas comunes, zona de juegos.



Imagen 2 - Plano emplazamiento y Piso 1. Fuente: Archiplan

3.1.2 Estructura y Materiales:

3.1.2.1 Integración Temprana: las etapas que conlleva realizar las actividades en planta industrializadora, se definen desde un Diseño usando el concepto de prefabricado e ingeniería de detalles (ver Imagen 3), la cual se trabaja en conjunto entre Industrializador + Constructora orientados en la implementación de metodología BIM. Luego de definir el diseño se continúa con la etapa de planificación de producción de paneles que darán forma al sistema modular.



Imagen 3 - Fabricación Estructural de Paneles y Módulos en Planta Industrializadora. Fuente: Tecnofast

3.1.2.2 Estructura: La Estructura principal, ya sean en muros y losa, corresponde a un sistema constructivo de Entramado Ligero en pieza de 41 x 90 mm en madera de pino radiata y en su estructura secundaria piezas de pino radiata de dimensiones 41 x 41 mm separados a 400 mm (ver Imagen 4).

3.1.2.3 Diseño Modular: Este consiste en la construcción de paneles en madera que, al unirlos, conforman un componente modular que da forma a un departamento (ver Imagen 5).

- Cada departamento está conformado por dos o tres módulos, dependiendo de la tipología de diseño.
- Las viviendas tienen superficies que varían entre 55 m² y 61 m², con tres dormitorios y unidades adaptadas para personas con movilidad reducida.
- 145 módulos en total, correspondientes a 3.783 m² construidos con un promedio de 59 m² x depto.



Imagen 4 - Detalle esquemático Estructura modelo BIM Proyecto Lo Espejo. Fuente: Archiplan

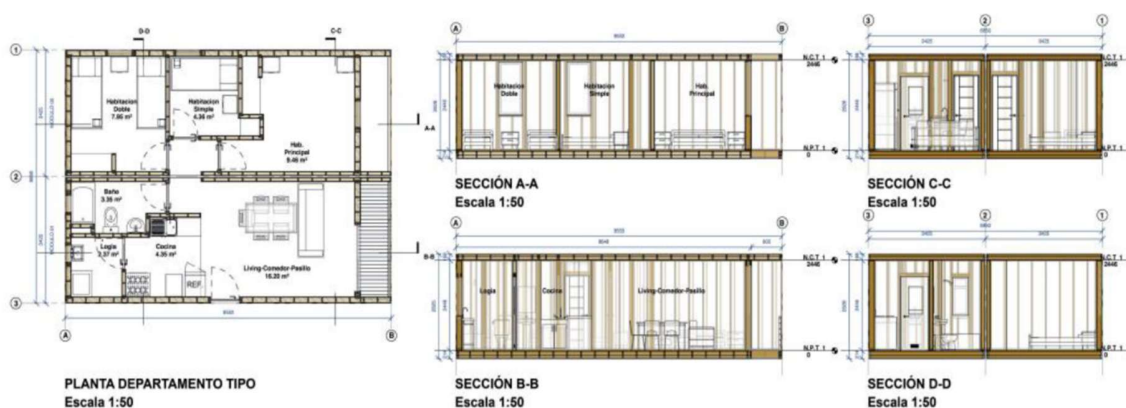


Imagen 5 - Detalle Planta y Secciones departamento tipo – Lo Espejo. Fuente: Archiplan

3.1.2.4 Aislamiento y Eficiencia Energética: el diseño de recubrimiento interior está formada por lana mineral $e=50$ mm, incluye barrera de vapor, Tablero de OSB $e=11$ mm y planchas de yeso cartón RF 15 mm de recubrimiento. En su recubrimiento exterior se considera membrana hidrofuga, plancha de OSB $e=11$ mm y su fachada considera “Revestimiento exterior Smart Panel – LP R4 ranurado vertical $e=11,1$ mm” con reforzamiento en las uniones de los módulos. Para los muros perimetrales se considera Lana roca mineral que tiene un excelente rendimiento en términos de resistencia al fuego evitando su propagación.

3.1.2.4.1 Ventanas de termopanel: El PDA, el cálculo y la ODS** solicitaban cumplir con lo estipulado dentro de la normativas y exigencias establecidas, en términos de ventilación, por orientación de fachadas, por dimensiones estructurales, definiéndose las dimensiones por modulo y el tipo de material según los resultados de los ensayos de transmitancia térmica.

3.1.2.4.2 Sistemas de ventilación: Cada departamento incorpora el concepto de ventilación pasiva para mantener la calidad del aire interior siguiendo la normativa térmica y acústica de la PDA para la región metropolitana (ver Imagen 6).

3.1.2.4.3 Celosías para Luz solar: mediante el concepto de ventilación activa, incorpora celosías móviles en terrazas para atrapar la radiación solar y contribuir con la sustentabilidad del proyecto.



Imagen 6 - Detalle Sistema de Ventilación Pasiva según normativa PDA para la RM.
Fuente: Elaboración Propia

3.1.3 Construcción y Montaje

3.1.3.1 Producción simultánea: El proceso de la panelización y los módulos se fabricaron en un ambiente controlado siendo la planta industrializadora de Tecnofast (mientras se preparan los cimientos en el terreno, reduciendo los tiempos de ejecución), siguiendo con la planificación de obra, estos fueron transportados y trasladados a obra mediante el uso de camiones pluma con el apoyo de alza-hombres mecanizados.

3.1.3.2 Rápido montaje: En obra, y mediante una grúa instalada de manera estratégica en el interior del recinto, los módulos se montaron y ensamblaron de tal manera que permitieron seguir con el montaje sin necesidad de realizar las fijaciones entre módulos y departamentos. Por ejemplo, se reporta que en 71 días se completó el montaje de todos los módulos de una sección del proyecto, al segundo día, ya se habían montado un total de 08 módulos según los propios registros de los antecedentes obtenidos en visita a obra. Esta estrategia permitió lograr los avances esperados y permitir la fluides en el proceso de fabricación en la planta industrializadora (ver Imagen 7).



Imagen 7 - Detalle secuencia de Montaje Módulos. Fuente: Tecnofast

3.1.3.3 Uniones Estructurales: Después de completar el montaje de un edificio, se comenzó con las actividades de fijaciones definitivas por módulo las cuales podemos dividir las en mecánicas y de uniones laterales:

3.1.3.3.1 Uniones Mecánicas:

Está contemplado el uso de fijaciones metálicas del tipo “holdowns” ubicados en los extremos de muros estructurales. Estos herrajes cumplen la función de realizar la unión de los módulos en sentido vertical otorgando la estabilidad entre módulos.

De ellos están considerados un total de 19 unidades por departamento. Estos holdowns metálicos de acero inoxidable son del tipo Strong-Tie HHDQ11-SDS2.5 de la marca Simpson (ver imagen 8).

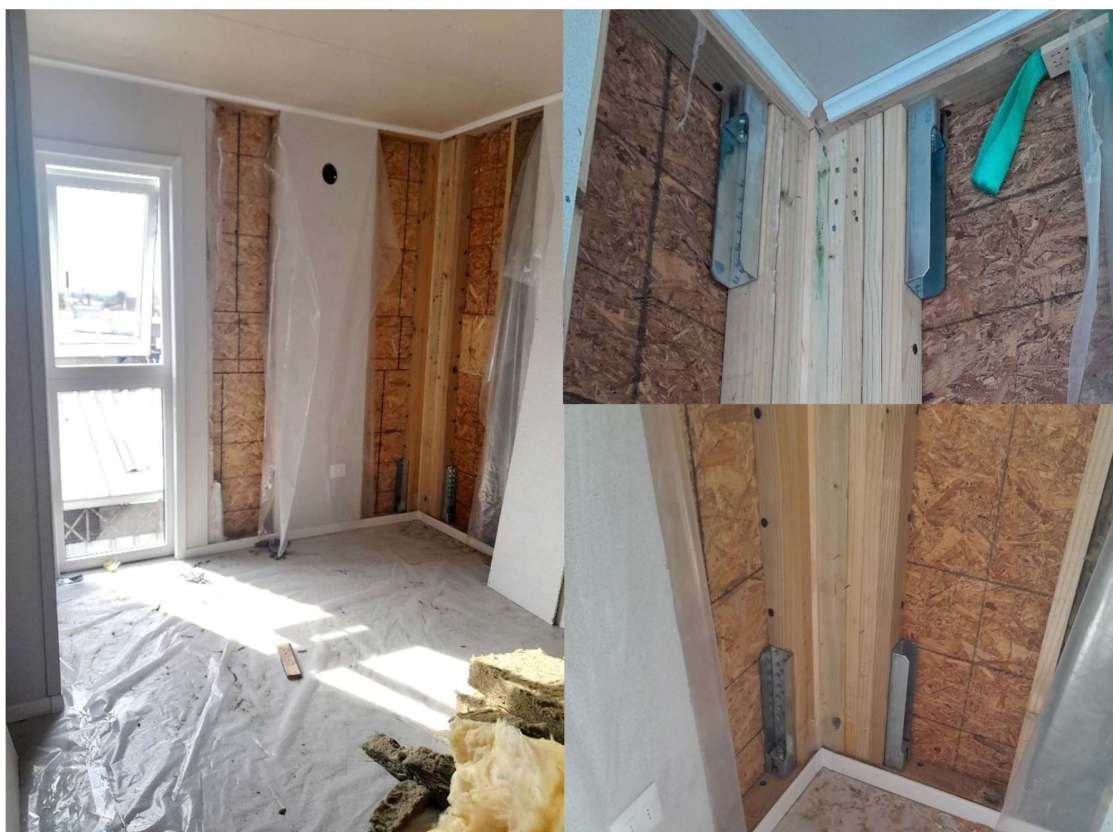


Imagen 8 – Uniones mecánicas: Holdowns en extremos muros estructurales y Uniones laterales entre módulos.
Fuente: Elaboración Propia

Además, incluye un perno hilos corrido tipo esparrago de $\varnothing 19$ mm largo de 1000 mm (en uniones del primer nivel con fundación este perno tiene 500 mm de largo), además de los tornillos que fijan el herraje a la estructura, cuya cantidad corresponde a un total de 30 un/holdowns de medidas de $\varnothing 1/4$ " x 2 1/2" SDS (ver imagen 9).



Imagen 9 – Uniones mecánicas: Espárragos en extremos muros estructurales y Uniones verticales módulos.
Fuente: Elaboración Propia

3.1.3.3.2 Uniones Laterales:

Para unir los módulos en función del eje horizontal entre departamentos, se utilizaron tornillos de doble rosca marca Simpson Strong-Tie de Ø8" x 330 mm utilizando la cantidad de 48 un/departamentos, instalados de manera angular según corresponda su solicitud por diseño. La ubicación de estos tornillos laterales corresponde a los cuatro extremos de los módulos (ver Imagen 10).

Simpson Strong-Tie® Structural Fasteners Technical Guide



Fastener Types

Solid-Drive™ SWD Double-Threaded WOOD Screw

Structural Wood-to-Wood Connections Including Glulam, CLT and General Interior Applications

The Solid-Drive® SWD is a double threaded structural screw designed to connect and pull together two wood members.

The small cylinder-head reduces the insertion torque and makes it possible to countersink the screws. The Protec+ coating is a wear resistant coating that can endure the friction of the installation and the exposure of high loads from the structural applications.

SWD screws are suitable for inclined and angled installations. Use the GSCREW screw guide to ensure that screws are installed with the correct angle into the timber.

Codes/Standards: ETA-21/0670

For more information, see pages 94, 139, 160, 165, 191, 201, 213, 217, 220.






ETA-21/0670

Features



Small cylinder head sinks into the wood allowing for hidden assemblies

Protec+ coating for protected outdoor applications

Deep 6-lobe recess provides improved control and greater bit life

The differentiated thread pitch creates a clamping effect that pulls the wood members together

The chisel point allows for skewed installations



SWD screws in a CLT butt-joint application.



SWD inclined installation of CLT floor panels.



Use the **GSCREW** screw guide to install SWD in inclined and angled roof insulation installations.

C-F-BU-16-2028 ©2023 SIMPSON STRONG-TIE COMPANY INC.

Imagen 10 - Conector de Doble rosca Ø8mm L=330mm marca Simpson Strong-Tie (ficha Técnica).
 Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente a este método de fijación, se utilizaron planchas de OSB $e=11,1$ mm los cuales cumplen el rol de unir los módulos y permitir la fijación y ajuste entre ellos. Esta actividad se desarrolla en obra permitiendo controlar las equivalencias y diferencias producidas por el montaje mismo de los módulos (ver Imagen 11).



**Imagen 11 - Tableros OSB $e=11,1$ mm de 1220 x 2440 mm unión entre módulos horizontal.
Fuente: Elaboración Propia**

3.1.3.4 Disposición de Patrones de fijaciones y uniones:

Según la información planimétrica y de detalles se presentan los detalles de ubicación, fijación de holdowns, disposición de tornillos y pernos los cuales son parte de la estructura de los módulos. La estructura de elevación tipo, refleja la ubicación y detalle de los Holdowns, así como también la identificación de piezas y componentes que conforman la estructura de entramado ligero de los módulos (ver imagen 12).

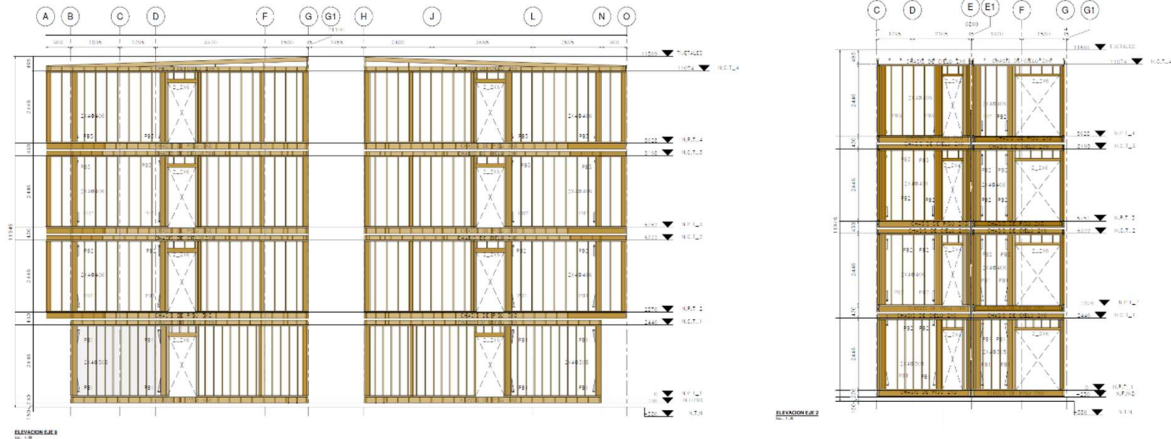


Imagen 12 - Detalle Elevación tipo y ubicación de Herrajes. Fuente: Simpson Strong-Tie

Gráficamente para la unión de los módulos del primer nivel, estos se realizan utilizando Varilla de anclaje de Ø1" de largo L= 500 mm (código RFB#1), que va introducido en la fundación de hormigón de armado utilizando adhesivo epoxico (anclaje químico SET-3G) para su fijación según detalle (ver imagen 13).

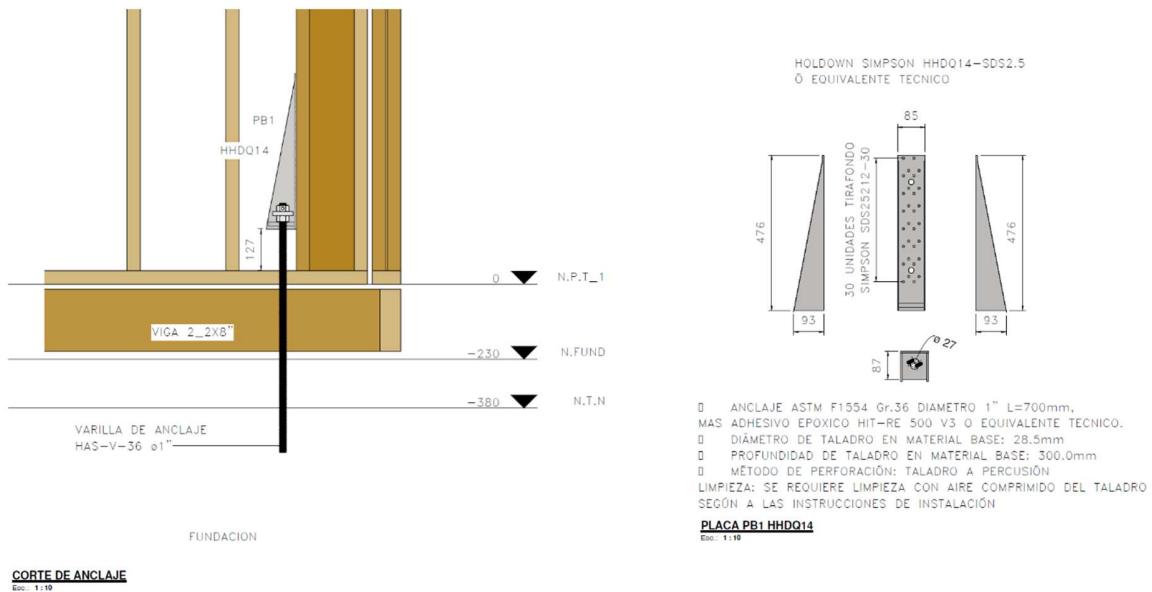


Imagen 13 – Detalle Varilla Anclaje (espárrago) y Holdowns tipo Primer nivel. Fuente: Simpson Strong-Tie

La barra roscada en el hormigón, primero se debe perforar, en este caso la barra es de un diámetro grande ($\varnothing 1"$) por lo tanto, la broca toma su tiempo en lograr la penetración, solo perforando serían unos 4 minutos, luego se debe limpiar el agujero, sacar el polvo, idealmente con compresor de aire comprimido (ver imagen 14)

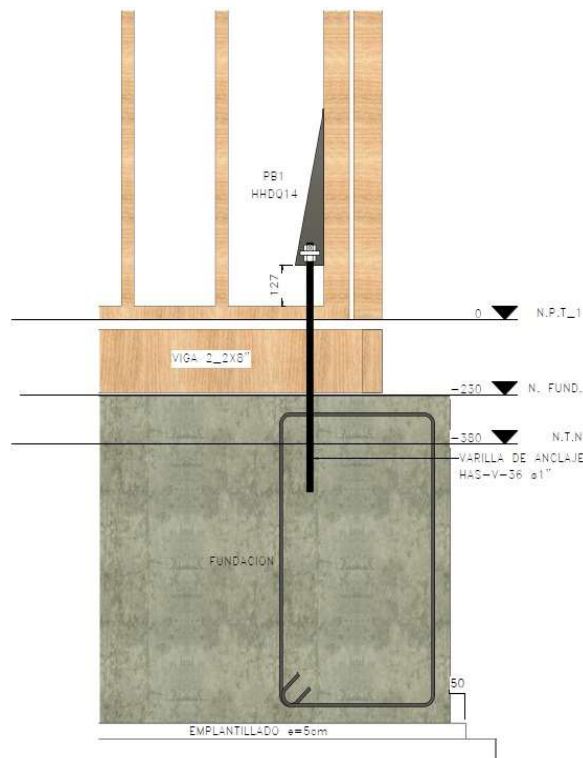


Imagen 14 - Detalle penetración Varilla Anclaje. Fuente: Simpson Strong-Tie

En relación con el epoxico el proceso de verter es rápido, lo que tarda es que finalmente fragüé el químico, para que tome la carga estructural final (carga de diseño) este procedimiento podría considerarse un tiempo de 24 horas, sin embargo, en que se endurezca y no se realicen movimientos de la barra, puede tardar unos 40 min aproximadamente (ver figura 15).

Programa de curado de SET-3G^{1,2}

Temperatura del concreto		Tiempo de gelatinización (minutos)	Tiempo de curado (horas)
(°F)	(°C)		
40	4	120	192
50	10	75	72
60	16	50	48
70	21	35	24
90	32	25	24
100	38	15	24

Para el Sistema Internacional de Unidades (SI): 1 °F = (°C x 9/5) + 32.

1. Para concreto saturado con agua, concreto sumergido y agujeros llenos de agua, los tiempos de curado deberán ser el doble de lo indicado.

2. Para la instalación de anclajes en concreto cuando la temperatura es inferior a 70 °F (21 °C), el adhesivo debe llevarse a una temperatura mínima de 70 °F (21 °C).

Imagen 15 – Programa de Curado Epóxico para Anclaje. Fuente: Simpson Strong-Tie

Considerando el detalle de unión para las uniones laterales entre módulos, se consideran conectores de doble rosca Ø8mm de largo L=300 mm modelo SWD330X8 (ver figura 10). Estos se instalan de manera angular, para lograr el afianzamiento de las placas de unión, tal como se redacta en el ítem 3.1.3.3.2 Uniones Laterales del documento. Para llevar a cabo este procedimiento de instalación de fijaciones, se estima un rendimiento del orden de 1min/tornillo utilizando las herramientas adecuadas para su instalación (ver figura 16).

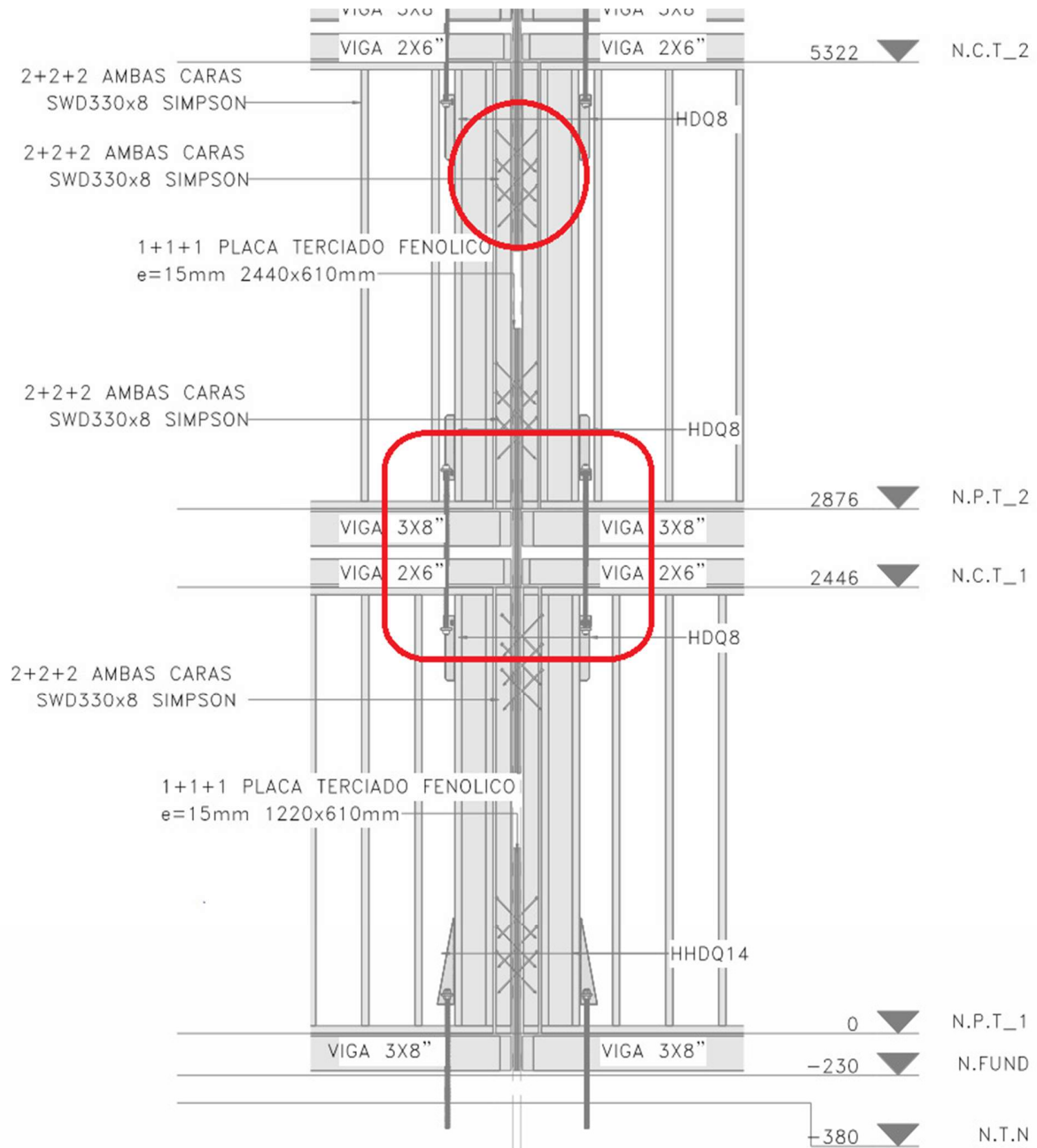


Imagen 16 - Detalle Elevación disposición fijaciones laterales y verticales. Fuente: Simpson Strong-Tie

La disposición de los tornillos SWD330X8 Simpson, consiste en el apoyo de una pieza guía (ver figura 17) para que la dirección de estos, cumplan con el ángulo de 45° tal como se refleja en la imagen 16. Es fundamental el uso de esta maestra para lograr la angulación requerida por especificación técnica.



Imagen 17 – Guía metálica instalación tornillos SWD330X8. Fuente: Simpson Strong-Tie

En elevación se visualizan los detalles de estructura entramado ligero, los herrajes y las fijaciones metálicas asociadas al sistema estructural de los módulos. (ver figura 18)

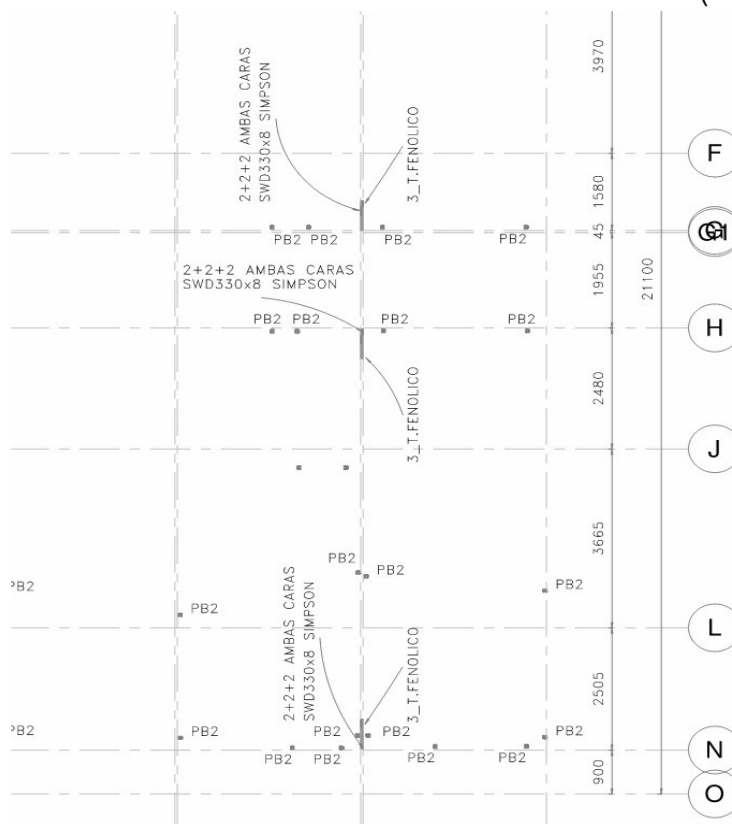


Imagen 18 - Detalle Planta disposición fijaciones. Fuente: Simpson Strong-Tie

También hay que considerar que, en las uniones verticales entre módulos, la instalación de espárragos de Ø19 mm largo de 1000 mm, tal como se detalla en el punto 3.1.3.3.1 uniones mecánicas del presente documento (ver figura 19)

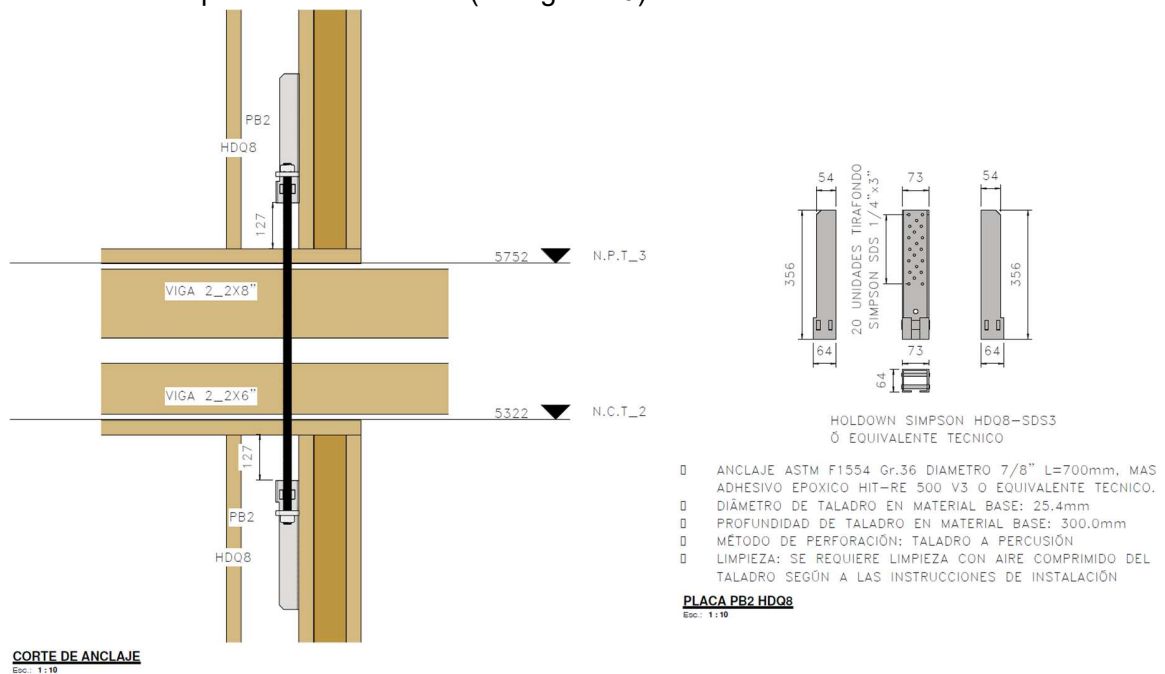


Imagen 19 – Corte de Anclaje unión modular nivel superior. Fuente: Simpson Strong-Tie

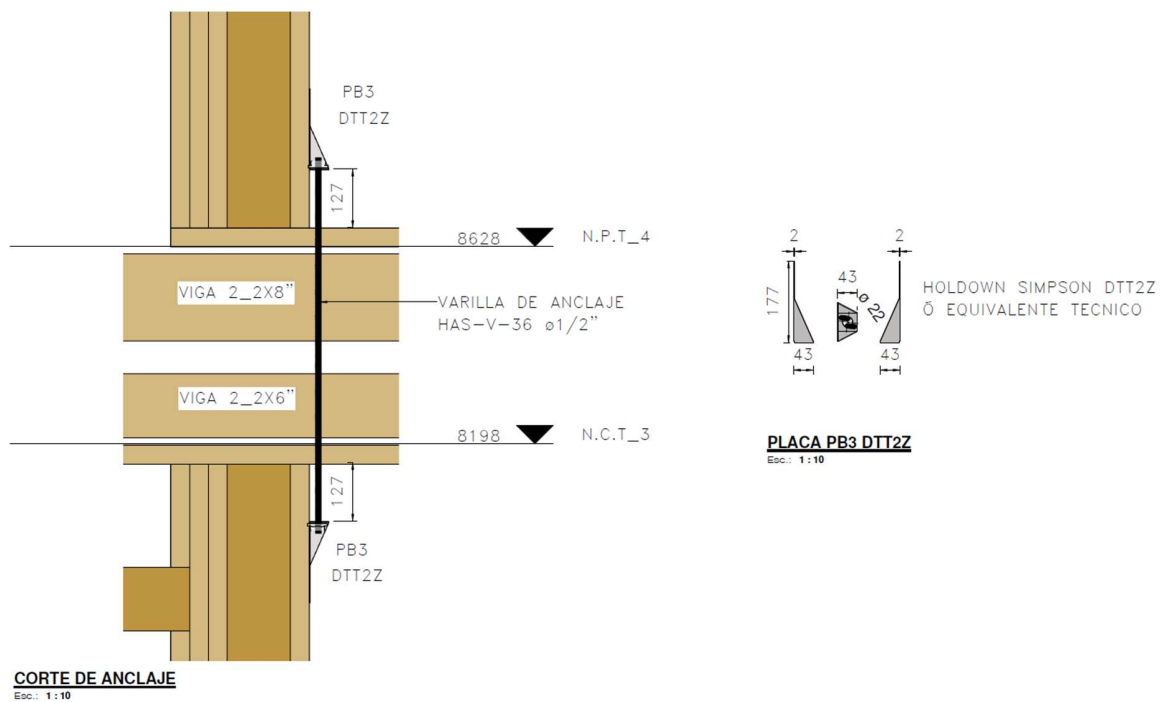


Imagen 20 – Corte de Anclaje unión modular nivel superior. Fuente: Simpson Strong-Tie

3.1.3.5 Cuadro Superficie Edificio Industrializado Lo Espejo

El Edificio Industrializado Lo Espejo es un proyecto habitacional de 4 pisos con un total de 60 departamentos. El primer piso cuenta con 15 unidades (14 departamentos de 3 dormitorios y 1 departamento accesible), mientras que los pisos 2, 3 y 4 tienen 15 departamentos cada uno, todos de 3 dormitorios. La superficie útil total del edificio es de 3,641.48 m², con un área común de 482.94 m², sumando una superficie total construida de 4,124.42 m². Los departamentos estándar tienen superficies entre 59.00 y 59.77 m², mientras que el departamento accesible (411) es más amplio con 68.77 m².

Una característica distintiva es que los departamentos en los pisos 2-3-4 incluyen terrazas de 1.41 m². La superficie útil promedio por departamento es de 60.69 m², y el área común representa el 11.71% de la superficie total del edificio. Los departamentos presentan diferentes tipologías (A, B, A2, A3, B1, B2, C) y orientaciones (SUR, NORTE, ORIENTE), ofreciendo variedad dentro del mismo proyecto constructivo (ver figura 21)

SUPERFICIES EDIFICIO INDUSTRIALIZADO LO ESPEJO												
PISO	TOTAL UNIDADES POR PISO	No. DEPTO	PROGRAMA	TIPOLOGIA Y ORIENTACION	SUPERFICIE UTIL	1/2 SUP UTIL TERRAZA	SUPERFICIE UTIL TOTAL	SUPERFICIE COMUN	TOTAL UTIL PISO	TOTAL COMUN	TOTAL CONSTRUIDO	
PISO 1	15		CIRCULACION		0,00	0,00	0,00	39,27	898,34	39,27	937,61	
		111	DEPTO 3 DORM	B SB SUR	59,00	0,00	59,00					
		112	DEPTO 3 DORM	B SB NORTE	59,00	0,00	59,00					
		113	DEPTO 3 DORM	A 2 SB NORTE	59,38	0,00	59,38					
		114	DEPTO 3 DORM	A SB SUR	59,41	0,00	59,41					
		211	DEPTO 3 DORM	B 1 SB SUR	59,00	0,00	59,00					
		212	DEPTO 3 DORM	A 2 SB NORTE	59,38	0,00	59,38					
		213	DEPTO 3 DORM	A 2 SB NORTE	59,38	0,00	59,38					
		214	DEPTO 3 DORM	A SB SUR	59,41	0,00	59,41					
		311	DEPTO 3 DORM	A SB SUR	59,41	0,00	59,41					
		312	DEPTO 3 DORM	A 2 SB NORTE	59,38	0,00	59,38					
		313	DEPTO 3 DORM	A 3 SB NORTE	59,41	0,00	59,41					
		314	DEPTO 3 DORM	B 2 SB SUR	59,00	0,00	59,00					
		411	DEPTO ACCESIBLE	C ORIENTE	68,77	0,00	68,77					
		412	DEPTO 3 DORM	A SB ORIENTE	59,41	0,00	59,41					
413	DEPTO 3 DORM	B SB ORIENTE	59,00	0,00	59,00							
PISOS 2-3-4	15 por piso		CIRCULACION				0,00	147,89	914,38	147,89	1.062,27	
		121-131-141	DEPTO 3 DORM	B SUR	59,37	1,41	60,78					
		122-132-142	DEPTO 3 DORM	B NORTE	59,37	1,41	60,78					
		123-133-143	DEPTO 3 DORM	A 2 NORTE	59,66	1,41	61,07					
		124-134-144	DEPTO 3 DORM	A SUR	59,65	1,41	61,06					
		221-231-241	DEPTO 3 DORM	B 1 SUR	59,25	1,41	60,66					
		222-232-242	DEPTO 3 DORM	A 2 NORTE	59,66	1,41	61,07					
		223-233-243	DEPTO 3 DORM	A 2 NORTE	59,66	1,41	61,07					
		224-234-244	DEPTO 3 DORM	A SUR	59,65	1,41	61,06					
		321-331-341	DEPTO 3 DORM	A SUR	59,65	1,41	61,06					
		322-332-342	DEPTO 3 DORM	A 2 NORTE	59,66	1,41	61,07					
		323-233-343	DEPTO 3 DORM	A 3 NORTE	59,77	1,41	61,18					
		324-334-344	DEPTO 3 DORM	B 2 SUR	59,37	1,41	60,78					
		421-431-441	DEPTO 3 DORM	B ORIENTE	59,37	1,41	60,78					
		422-432-442	DEPTO 3 DORM	A 1 ORIENTE	59,77	1,41	61,18					
423-433-443	DEPTO 3 DORM	B ORIENTE	59,37	1,41	60,78							
45	total 3 pisos								2743,14	443,67	3.186,81	
TOTAL	60	total 4 pisos								3.641,48	482,94	4.124,42

Imagen 21 – Superficies Edificio Industrializado Lo Espejo. Fuente: Archiplan

3.1.3.6 Tabla Rendimiento Instalación de Fijaciones

El cuadro muestra el rendimiento de montaje para el Edificio Industrializado Lo Espejo, detallando cinco elementos principales: montaje de espárragos en fundación (L=500 mm) y niveles superiores (L=1000 mm), aplicación de epóxico químico, instalación de holdowns Simpson y tornillos de unión laterales (L=330 mm). La aplicación de epóxico químico es la tarea más intensiva, requiriendo 12.67 horas por departamento, mientras que el tiempo total de montaje por departamento es de 18.86 horas hombre. Cada departamento requiere 19 unidades de la mayoría de los elementos, excepto los tornillos de unión laterales que necesitan 48 unidades. El total de HH incurridas para el montaje de 145 módulos es de 27.041 horas hombres (ver imagen 22)

Elementos	Largo (mm)	Rend/und (min)	Rend/und (horas)	Total Elem/Depto	Rend/Depto (horas)	Horas Labor Efectivas/día	5	
						Personal/Cuadrilla	Total HH	
Montaje Espárragos Fundación	500	4 min/Esp	0,07	19	1,27	1	5	
Aplicación Epóxico químico	N/A	40 min/Epox	0,67	19	12,67	1	48	
Montaje Espárragos Niveles Superiores	1000	4 min/Esp	0,07	19	1,27	2	10	
Holdowns Simpson HHDQ11-SDS2.5 + tornillos Ø1/4" x 2 1/2" SDS	N/A	7 min/HHD	0,12	19	2,22	2	17	
Instalación Tornillos Unión Laterales	330	2 min/tornillo	0,03	48	1,44	1	14	
Totales						18,86	7	93
Total HH Montaje x 2 Cuadrillas						186		

Und.Total Módulos Proy.	145	Días/Depto	3,8
HH Totales p/Fijación	27.041	Días Totales Montaje (145 modulos)	38
		Nº Cuadrillas	2
		Horas/Depto	9,4
		Días/Depto (2 Cuadrillas)	1,89
		Días Totales Montaje (145 modulos)	15,4

Imagen 22 - Detalle de suministros y servicios instalados en obra. Fuente: Elaboración Propia

Es preciso señalar que por concepto de montaje de los 145 módulos se realizó en 72 días, mientras que para las actividades de fijación modular esta se realizó en 15.4 días utilizando 02 cuadrillas de 07 personas cada una. La estrategia del proyecto fue realizar las actividades de izaje y montaje de los módulos y después comenzar con el proceso de fijación de estos, comenzando por el edificio N°1 ubicación poniente (ver imagen 23)

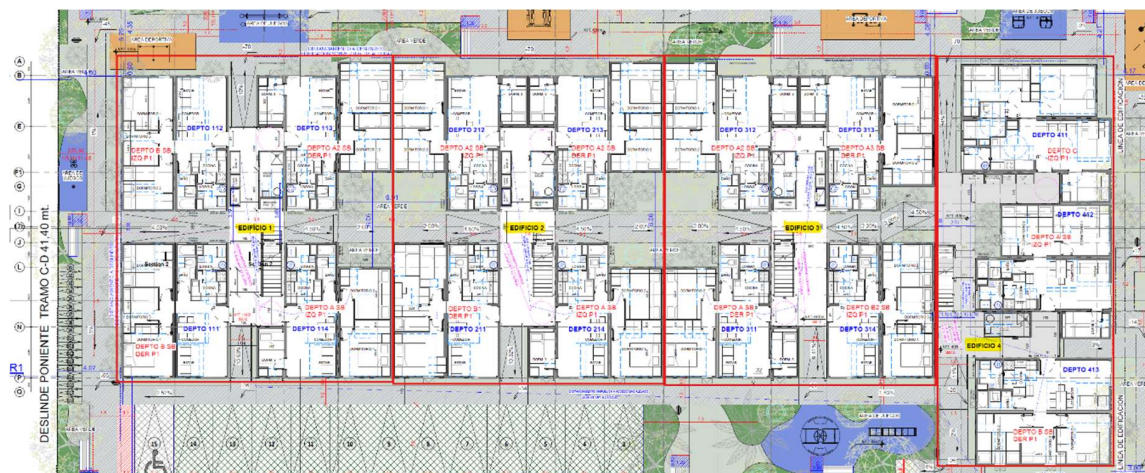


Imagen 23 - Detalle de suministros y servicios instalados en obra. Fuente: Archiplan

3.1.4 Componentes y Terminaciones:

3.1.4.1 Puertas y pisos recubiertos: En lo que respecta a pisos, este incorpora el uso del tipo Piso vinílico de $e=2$ mm en formato de 15.2×91.4 cm. La característica principal del porque se designó este tipo de piso, se debe a que existen las uniones modulares en el interior de cada departamento las cuales se realizan al final del montaje y fijación, es que porque el piso vinílico entrega tolerancias y elasticidad en aquella zona en particular adaptándose a los movimientos modular evitando posibles visuras a simple vista en los pisos, versus los pisos tradicionales.

3.1.4.2 Cocinas eléctricas, Termo Eléctrico, Pintura Cielo y Conexiones de servicios: Por ser un “Proyecto DS49”, normalmente se entrega como una obra habitable, sin embargo, se acordó con SERVIU, realizar el montaje de estos en obra, con el objetivo de poder evitar cualquier intervención producto del traslado y transporte y también en el proceso de izaje para el montaje de cada módulo y también no incurrir en tiempos/costos mayores de reparación (ver Imagen 24).



Imagen 24 - Detalle de suministros y servicios instalados en obra. Fuente: Elaboración Propia

3.1.4.3 Escalas de Acceso y Pasillos Metálicos: las actividades de montaje de las escalas y pasillos de acceso, se realizó en obra, posterior al procedimiento de fijación de los módulos de departamentos. Estas fueron diseñadas en estructura metálica, mediante perfiles de acero inoxidable (ver Imagen 25).

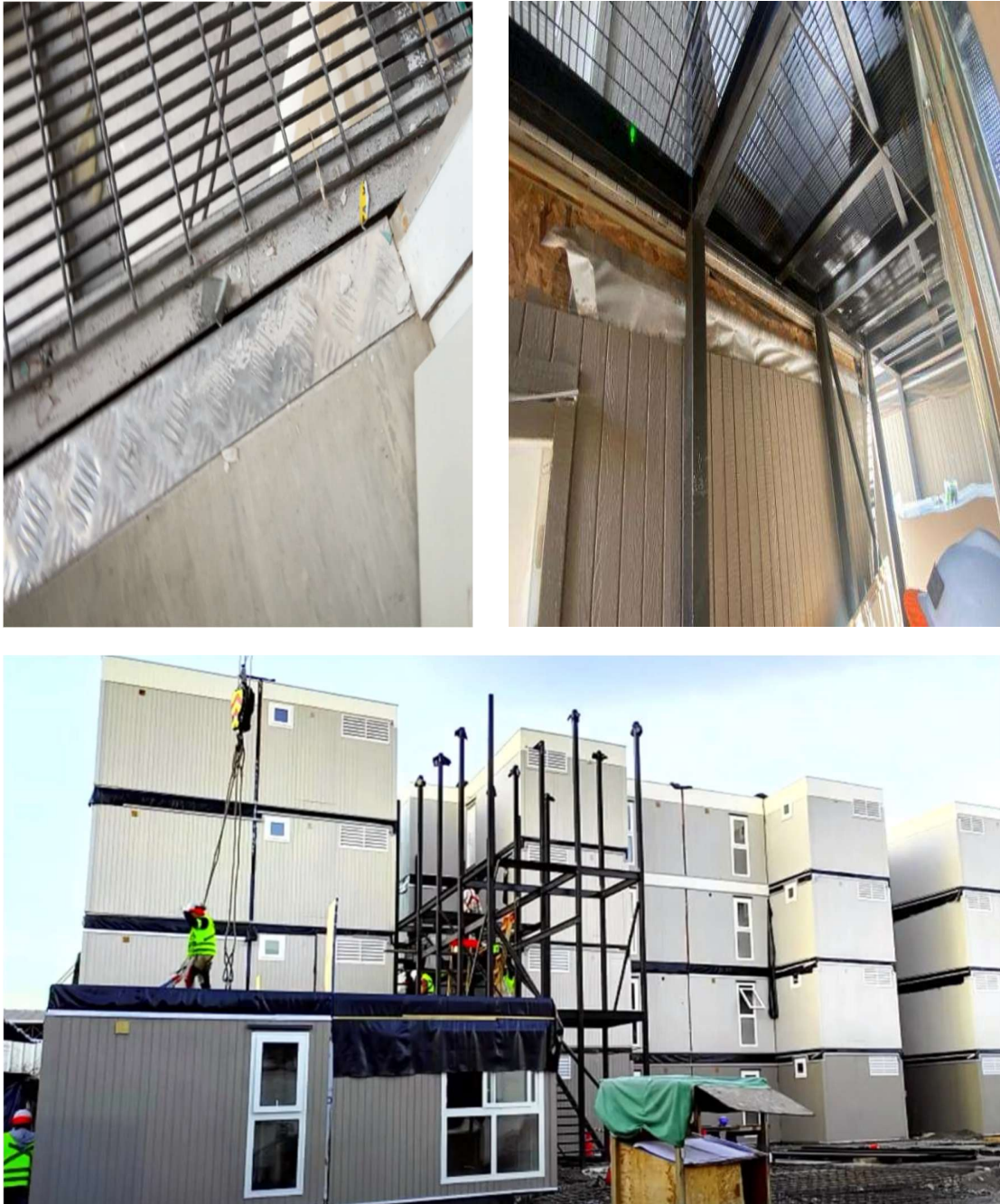


Imagen 25 - Detalle unión modular - estructura pasillos metálicos. Fuente: Elaboración Propia

3.1.4.4 Cierre Plancha de conexión: Donde existiera los puntos de fijación y conexión vertical entre módulos, estas planchas de revestimiento interior se retiraban en obra, y que ya venían dispuestas para facilitar el desmontaje y una vez realizadas las actividades de fijación y nivelación, se procedía al montaje manteniendo el estándar de las terminaciones (ver Imagen 26).

3.1.4.5 Cierres horizontales entre Módulos: estas actividades de cierre (costuras), se definieron arquitectónicamente diferenciándolo con un color diferente, con el objetivo de evidenciar la separación entre los niveles de módulos. Estas se realizaron en obra, una vez terminadas las actividades de fijación y conexión vertical entre módulos (ver Imagen 27).

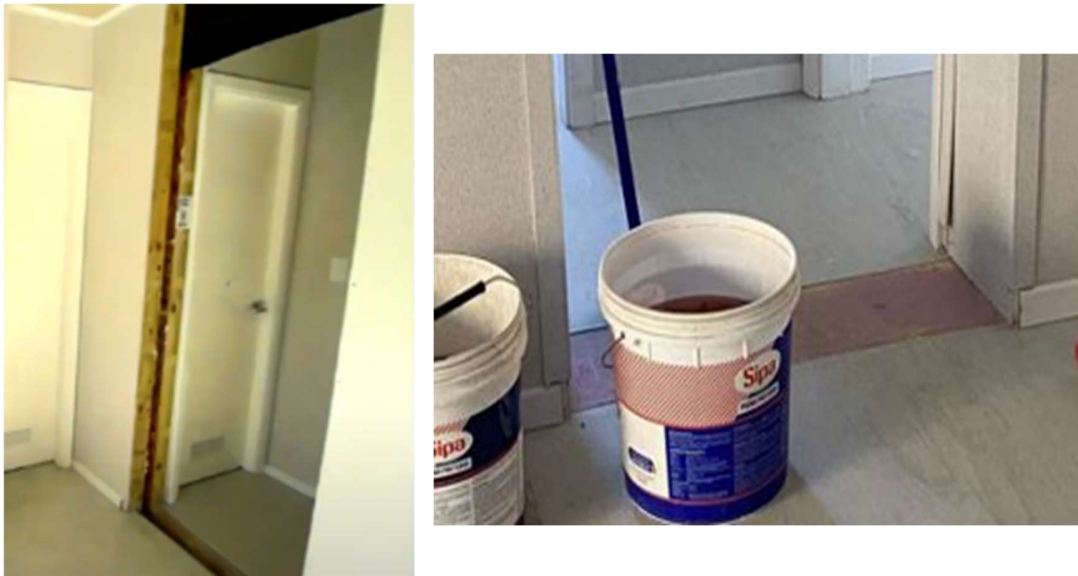


Imagen 26 - Detalle unión entre módulos y su terminación "costura". Fuente: Elaboración Propia



Imagen 27 - Detalle unión entre módulos y su terminación exterior. Fuente: Elaboración Propia

3.1.5 Sostenibilidad:

3.1.5.1 Paneles Fotovoltaicos en techumbre: Este proyecto incorpora los ERNC*** como Sistema considerado para alimentar espacios comunes por concepto de ahorro en GGCC para la comunidad, estos incluyen: iluminación áreas verdes, accesos, estacionamientos, iluminación pasillos y escaleras.

3.1.6 Normativas y Requerimientos:

3.1.6.1 Programa Habitacional Fondo Solidario de Elección de Vivienda Decreto Supremo N°49: El proyecto cumple con los estándares del subsidio DS49, que exige viviendas sociales de calidad, funcionales y adaptadas a las necesidades de las familias beneficiarias. Para el proyecto se ajusta a las restricciones de diseño y transporte de módulos, en lo relacionado con dimensiones específicas para facilitar su traslado y montaje.

3.1.6.2 PDA: En ese momento de diseño del proyecto, el PDA de la Región Metropolitana aún no estaba vigente, pero su cumplimiento ya se requería en los términos de la licitación. Esta situación impactaba principalmente en la fase de diseño y construcción del proyecto, más allá de las soluciones técnicas específicas que el industrializador debía desarrollar y garantizar. El efecto directo se manifestaba en la necesidad de ajustar la configuración de los muros de acuerdo con las restricciones impuestas por el PDA, como la limitación del tamaño máximo de los vanos, que variaba en función de la orientación de cada fachada (ver Imagen 28).

Estas restricciones buscaban optimizar el rendimiento energético del edificio, reduciendo pérdidas térmicas y mejorando la eficiencia energética, lo que requería una planificación cuidadosa para cumplir con las exigencias regulatorias sin comprometer la funcionalidad o el diseño arquitectónico del proyecto (ver Imagen 29).

U ≤	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4	4,4	5,8
NORTE	91 %	89 %	87 %	85 %	83 %	80 %	77 %	73 %	69 %	25 %
ORIENTE-PONIENTE	70 %	68 %	65 %	63 %	60 %	57 %	53 %	49 %	44 %	15 %
SUR	59 %	57 %	54 %	51 %	48 %	44 %	40 %	35 %	29 %	10 %
POND	41 %	40 %	38 %	37 %	35 %	33 %	31 %	28 %	25 %	10 %

Imagen 28 – Porcentaje máximo de superficies de ventanas según orientación y Factor U. Fuente: Archiplan

ORIENTACION	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°



Imagen 29 – Definición de orientaciones para acreditaciones de exigencias de complejo de ventanas- Fuente: Archiplan

Este proyecto enfrentó grandes desafíos en términos de dar cumplimiento a la reglamentación térmica que aún no se encontraba en vigencia, sin embargo, se consideró adaptarlo con esta normativa, con ello se realizaron los cálculos correspondientes para poder entregar al proyecto los conceptos y requisitos de diseño y de la habitabilidad requerida (ver Imagen 30).

FACHADA 1 (PPAL)				NORTE		ORIENTE-PONIENTE		SUR		MODELO DEPTO A1	
AREA FACHADA POR RECINTOS				VALOR U	3,6	VALOR U	3,6	VALOR U	3,6		
DORM 1	3,160	x	2,446	7,73	% MAX. SUPERFICIE VENTANAS AL NORTE	77 %	% MAX. SUPERFICIE VENTANAS AL PONIENTE-ORIENTE	53 %	% MAX. SUPERFICIE VENTANAS AL SUR		40 %
LIVING	3,160	x	2,446	7,73							
DORM 3	1,510	x	2,446	3,69							
AREA TOTAL FACHADA 19,15 M2				AREA TOTAL VENTANAS 5,49 M2							
% SUPERFICIE DE VENTANAS				5,49	19,15	28,64 %	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE		
FACHADA LOGGIA-BAÑOS				NORTE		ORIENTE-PONIENTE		SUR			
AREA FACHADA POR RECINTOS				VALOR U	4,4	VALOR U	4,4	VALOR U	4,4		
DORM 2	3,170	x	2,446	7,75	% MAX. SUPERFICIE VENTANAS AL NORTE	69 %	% MAX. SUPERFICIE VENTANAS AL PONIENTE-ORIENTE	44 %	% MAX. SUPERFICIE VENTANAS AL SUR		29 %
BAÑO	1,200	x	2,446	2,94							
LOGGIA	1,420	x	2,446	3,47							
DORM 3	1,510	x	2,446	3,69							
AREA TOTAL FACHADA 17,86 M2				AREA TOTAL VENTANAS 2,16 M2							
% SUPERFICIE DE VENTANAS				2,16	17,86	12,07 %	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE		
FACHADA LATERAL				NORTE		ORIENTE-PONIENTE		SUR			
AREA FACHADA POR RECINTOS				VALOR U	4,4	VALOR U	4,4	VALOR U	4,4		
DORM 1	3,550	x	2,446	8,68	% MAX. SUPERFICIE VENTANAS AL NORTE	69 %	% MAX. SUPERFICIE VENTANAS AL PONIENTE-ORIENTE	44 %	% MAX. SUPERFICIE VENTANAS AL SUR	29 %	
DORM 2	3,150	x	2,446	7,70							
BAÑO	1,460	x	2,446	3,57							
AREA TOTAL FACHADA 19,96 M2				AREA TOTAL VENTANAS 0,30 M2							
% SUPERFICIE DE VENTANAS				0,30	19,96	1,52 %	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE		

Imagen 30 – Calculo aplicación PDA Región Metropolitana. Fuente: Archiplan

3.2 Determinar criterios de desmontaje según normativa internacional en base al cumplimiento del desmontaje de la ISO-20887 y aplicados al Proyecto de Investigación:

3.2.1 Evaluación Insitu para Adaptabilidad: se realizó una evaluación de 12 principios de diseño para la adaptabilidad, utilizando la matriz de evaluación de viabilidad presentes en anexo N°1 de la normativa ISO-20887 (ver Tabla N°1).

Dimensión	Criterio de Adaptabilidad		Si Cumple	Cumple Parcial	No Cumple
General	a	Se adapta a los cambios en el tipo de uso, demografía, necesidades del usuario o debido a factores externos, logra la resiliencia o protección para el futuro	1		
Versatilidad	a	Sistema constructivo intercambiable		1	
	b	Ejemplos de versatilidad			1
	c	Componentes multifuncionales			1
	d	Adaptabilidad espacial		1	
Convertibilidad	a	Estructura principal (claros largos y postes/vigas)			1
	b	Adaptabilidad (flexibilidad interior)			1
	c	Elementos base (cáscara genérica)			1
Capacidad de Expansión	a	Capacidad de expansión			1
	b	Flexibilidad estructural			1
	c	Adaptabilidad a demanda			1
	d	Ejemplos prácticos de implementación			1
			1	2	9

Tabla N°1 – Criterios de Adaptabilidad
Fuente: Elaboración Propia

3.2.2 Evaluación Insitu para Desmontaje: se realizó una evaluación de los 37 principios de diseño para el desmontaje, utilizando la matriz de evaluación de viabilidad presentes en anexo N°1 de la normativa ISO-20887 (ver Tabla N°2).

Dimensión	Criterio de Desmontaje		Si Cumple	Cumple Parcial	No Cumple
General	a	Estos principios se aplican a los conjuntos y sistemas dentro de un activo construido que se pueden desmontar al final de su vida útil o renovar, con el potencial de que los componentes de utilicen para otros fines.			1
Facilidad de Acceso a componentes y servicios	a	Acceso fácil a componentes			1
	b	Conexiones visibles			1
	c	Espacio para desmontaje			1
	d	Independencia de elementos		1	
	e	Minimización de daños		1	
	f	Facilidad de mantenimiento		1	
Independencia (general y conexiones reversibles)	a	Envoltura y núcleo	1		
	b	Servicios mecánicos y eléctricos	1		
	c	Equipamiento	1		
Evitar tratamientos y acabados innecesarios	a	Dejar el espacio necesario en todos los lados para dar cabida a las opciones de desmontaje			1
	b	Requerir las mismas herramientas estándar para el montaje y el desmontaje		1	
	c	Utilizar métodos de conexión universalmente reconocidos que no dañen los materiales que se conectan ni las zonas circundantes			1
	d	Minimizar la interdependencia de diferentes materiales, productos, componentes o sistemas.			1

Dimensión	Criterio de Desmontaje		Si Cumple	Cumple Parcial	No Cumple
Dimensión	a	Reutilización			1
	b	Renovabilidad		1	
	c	Remanufacturabilidad			1
	d	Mayor reciclaje			1
	e	Reciclaje futuro (reciclabilidad)			1
Simplicidad	a	Diseño sencillo		1	
	b	Mínima personalización			1
	c	Reducción de componentes			1
	d	Homogeneidad de materiales		1	
	e	Facilidad de desmontaje			1
	f	Optimización de recurso			1
Estandarización	a	Dimensiones, como altura estándar y tamaños que permitan múltiples tipos de uso.	1		
	b	Componentes, como longitudes y tramos estándar para facilitar su reutilización y sustitución.		1	
	c	Conexiones, como piezas de conexión que puedan separarse utilizando herramientas estándar y fácilmente disponibles.	1		
	d	Modularidad, como módulos volumétricos que se pueden unir, agregar o quitar para promover entornos de vida o de trabajo adaptables.		1	

Dimensión	Criterio de Desmontaje		Si Cumple	Cumple Parcial	No Cumple
Seguridad del Desmontaje	a	Plan de desmontaje inicial			1
	b	Documentación completa			1
	c	Accesibilidad			1
	d	Conexiones expuestas			1
	e	Independencia componentes			1
	f	Simplicidad			1
	g	Estandarización			1
	h	Durabilidad			1
			5	9	23

Tabla N°2 – Criterios de Desmontaje
Fuente: Elaboración Propia

3.2.3 Evaluación para Documentación: revisando la documentación y la información del proyecto según los criterios establecidos en anexo 1 de la normativa ISO 20887, se observa un balance mixto en el cumplimiento de los 5 requisitos (ver Tabla N°3).

Descripción de la documentación y la información.	SI cumple	NO cumple
Detalles de diseño DfD/A en planos, especificaciones, plano de desmontaje.		1
Plan de desmontaje/deconstrucción, incluida información sobre la secuencia del desmontaje		1
Inventario trazable de materiales, proveedores, garantías.	1	
Enfoque desarrollado e integrado en la entrega y operación para garantizar la transferencia y actualización durante toda la vida del activo construido.	1	
Componentes, productos y activos construidos tienen información directamente accesible relacionada con la identificación, garantías, vida útil y desmontaje		1
	2	3

Tabla N°3 – Criterios de Documentación e Información
Fuente: Elaboración Propia

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis realizado al proyecto revela limitaciones significativas en su capacidad para contribuir a la economía circular, evidenciadas por los resultados de la evaluación basada en la norma ISO-20887. Sin embargo, los resultados obtenidos en la evaluación de viabilidad indican un bajo cumplimiento de estos criterios, lo que sugiere que el diseño original del proyecto no consideró en el diseño la posibilidad de incluir el uso de conectores mediante “kit de montaje” que permiten pensar en potencial final de la vida útil del edificio.

Revisando los resultados específicamente, en la evaluación de adaptabilidad, de los 12 criterios analizados, solo un 8.3% cumple completamente con los requisitos establecidos, mientras que un 16.7% presenta un cumplimiento parcial. Esto significa que la mayor parte de los elementos evaluados no están diseñados para facilitar modificaciones futuras. En cuanto a la evaluación de desmontaje, la situación es similar: de los 37 criterios evaluados, solo el 13.5% cumple completamente, mientras que un 24.3% cumple de manera parcial. Estos porcentajes reflejan una carencia fundamental en la consideración del desmontaje desde la etapa de diseño, lo que dificultará la reutilización de materiales y componentes cuando el edificio llegue al final de su vida útil. A pesar de que el proyecto representa un avance en la construcción industrializada en madera, sus deficiencias en cuanto al criterio de DfD/A revelan la falta de integración de principios clave de la economía circular. Para la evaluación de la documentación e información, de los 5 criterios, solo un 40% de la documentación necesaria está disponible y organizada de manera adecuada, mientras que el 60% restante presenta deficiencias o está ausente.

En el contexto internacional, existen experiencias exitosas como lo realizado en los Países Bajos, donde la implementación del DfD/A ha demostrado ser viable y beneficiosa tanto en términos ambientales como económicos. El edificio Campus Hambaken es un ejemplo claro que ha fomentado la creación de edificios que pueden ser desmontados de manera eficiente, implementando el uso de Kit de montaje utilizando soportes metálicos del modelo comercial ALUMEGA de la compañía italiana Rothoblaas, facilitando la reutilización de materiales y reduciendo la generación de residuos de construcción y demolición. Esto contrasta con lo realizado en el proyecto, dado que se podría haber considerado este sistema de kit de montaje en la etapa de diseño, como una acción clara para mejorar la circularidad en el proyecto, en la obra y en la gestión de residuos que promuevan la sostenibilidad en la construcción industrializada en Chile.

Este enfoque implica facilitar la implementación de acciones y medidas a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio, desde la etapa de su diseño hasta la gestión de residuos, considerando: la evaluación de los principios de desmontaje, revisión de detalles constructivos, plan de desmontaje, identificación de los materiales, plan de mantenimiento, procedimiento de la gestión de la información de la vida útil del edificio y la implementación de modelos BIM para facilitar la información integrada del proyecto.

Abordar estas oportunidades será clave para garantizar una transición efectiva hacia la construcción circular en Chile, permitiendo que el sector adopte prácticas sostenibles que contribuyan a la reducción de residuos y al aprovechamiento eficiente de los recursos para proyectos industrializados de mediana altura construidos modularmente en madera, todo esto se relaciona con el concepto de las “9rs” de la economía circular en la construcción indicadas en la ISO-20887, como recomendación según los resultados para futuros proyectos dependiendo de su enfoque.

Considerando la información del libro “Hoja de Ruta para un Chile circular al 2040”, la cual establece estrategias de producción y consumo dejando atrás la lógica lineal del extraer, producir, consumir y desechar; esta hoja de ruta no se traduce en una regulación vinculante que exija la incorporación de criterios de adaptabilidad y desmontaje en los proyectos de construcción industrializada.

La falta de un estándar específico que regule estos aspectos dificulta la implementación efectiva de los principios de economía circular, lo que pone en desventaja a la industria chilena en comparación con otros países que han avanzado significativamente en esta materia.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de la evaluación de viabilidad aplicados al proyecto demuestran que no cumple con los criterios de desmontaje, no obstante, si se consideraran los ejemplos internacionales de diseño como el uso de kit de montaje, se podría crear una cultura industrial colaborativa centrada en la difusión de conocimientos entre las partes involucradas en el proceso de construcción, dando como resultado el aumento de estrategias, métodos y prácticas circulares con el único objetivo de pavimentar el camino para la creación de una normativa nacional para el desmontaje.

El diseño de los proyectos de construcción industrializados modulares en madera en Chile, en términos de diseño, optimización de tiempo/costo y control de residuos, cumplen con el objetivo de llevar el plan de emergencia habitacional a su mínima expresión en la actualidad, sin embargo, falta un aspecto importante y que no está siendo considerado por los entes participantes en los proyectos y es que podemos plantear la idea de pensar en diseñar los futuros proyectos industrializados modularmente en madera, y porque no híbridos, trabajando desde ya en una normativa nacional vinculante como lo es el estándar internacional ISO-20887 que constituye el marco normativo correspondiente a la economía circular en la construcción, marcando las directrices a seguir por parte de todos los participantes del sector y la industria de la construcción marcando una guía para el final de la vida útil de los edificios.

Si bien a nivel nacional se cuenta con una guía que define la economía circular como impulsora de un desarrollo sostenible para Chile al 2040, esta no especifica claramente los requisitos y orientaciones en el diseño para el desmontaje y la adaptabilidad en la edificación, teniendo en cuenta que existe una importante oportunidad económica para que Chile reconsidere la manera en que se diseñan, gestionan y mantienen los edificios industrializados en madera, así como la manera en que los materiales y recursos de construcción pueden recuperarse de manera más eficaz y reincorporarse a la cadena de suministro al final de la vida útil para eliminar los desechos en todas sus dimensiones. Esto, a su vez, tiene el potencial de entregar beneficios económicos, sociales y ambientales incluyendo las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ArchDaily. (s.f.). Diseño para desmontaje: Las más recientes noticias y obras de arquitectura. <https://www.archdaily.cl/cl/tag/disenio-para-desmontaje>

Ariza-Rossy, B. (26 de agosto de 2024). Economía circular en la industria de la madera. Madera Sostenible. <https://madera-sostenible.com/software/economia-circular-en-la-industria-de-la-madera/>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2021). Economía circular: Concepto, implicancias, indicadores y sistemas de monitoreo. Asesoría Técnica Parlamentaria. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32826/1/Informe_BCN_Economia_Circular_concepto_FINAL.pdf

Brannen, P. (2024). Timber! How Wood Can Help Save the World from Climate Breakdown. Agenda Publishing.

Bryden Wood. (2023). Platforms in Practice; A lean approach to industrialized construction. Bryden Wood. https://constructioninnovationhub.org.uk/media/l3bhzunv/platforms-in-practice_final.pdf

Brydenwood. (a) (s.f.). Design for manufacture and assembly (DfMA). <https://www.brydenwood.com/what-we-do/design-for-manufacture-and-assembly-dfma/s91293/>

Brydenwood. (b) (s.f.). P-DfMA Platform Design for Manufacture and Assembly. <https://www.brydenwood.com/pdfma/s91791/>

Campos-Cambra, A. (16 de febrero de 2024). Análisis del Ciclo de Vida. ISO 20887: Principios, requisitos y directrices de la economía circular. Zero Consulting. <https://blog.zeroconsulting.com/economia-circular-iso-20887>

Campus Offices. (s.f.). Houtbouw Den Bosch Project. Campus Offices. <https://www.campusoffices.com/projecten/houtbouw-den-bosch>

Canadian Standards Association. (2006). Guideline for design for disassembly and adaptability in buildings. Canadian Standards Association. <Circular Economy & the Built Environment Sector in Canada>

Canadian Standards Association. (2006). Guideline for Design for Disassembly and Adapatability in Buildings, CSA-Z782-06. CSA Group. <https://webstore.ansi.org/standards/csa/csaz7822006>

Centro Tecnológico para la Innovación en la Construcción (CTEC). (2024). Guía Introductoria Métodos Modernos de Construcción, versión 2 (Guía MMC). Editor Biobío Madera.

https://ctecinnoacion.cl/wpcontent/uploads/2024/04/2024_GUIA_MMC_CTEC_CCHC.pdf

Circular Wood. (s.f.).

<https://www.arc.ed.tum.de/holz/forschung/circularwood/cw-home/uebercircularwood/>

Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción (CDT). (2021). Estrategia economía circular en construcción: Propuesta de estrategia sectorial 2021-2025.

https://drive.google.com/file/d/1ht0hpDiSM-4LGS_6WEIOB6Y931cGsxha/view

Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción (CDT). (2021). Introducción a la economía circular en la construcción: Diagnostico y oportunidades en Chile.

<https://drive.google.com/file/d/1n-nxGigr6cND70jiiuKCEBp7ASvyKmT4/view>

Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción (CDT). (24 de junio de 2021). Economía Circular Construcción. Consejo de Construcción Industrializada.

<https://drive.google.com/file/d/1M0VnmrptJazh1Niz047M3WnwVteFk8PS/view>

De Wolf, M. (8 de noviembre de 2022). La construcción industrializada pisa fuerte con el DfMA. Autodesk. <https://www.autodesk.com/es/design-make/articles/bryden-wood>

Decreto Supremo N°49 de 2011 [Ministerio de Vivienda y Urbanismo]. Programa habitacional fondo solidario de elección de vivienda. 13 de septiembre de 2011.

Economía Circular. (14 de junio de 2020). Estrategia de economía circular en la construcción: cambiando el paradigma. Economía Circular Construcción. <https://www.economiacircularconstruccion.cl/estrategia-de-economia-circular-en-la-construccion-cambiando-el-paradigma/>

Fundación Chile. (2020). Economía Circular y sector Construcción en Chile. Comisión Nacional de Productividad. <https://cnep.cl/wp-content/uploads/2020/12/Background-Report-Economi%CC%81a-Circular-y-sector-Construccion%CC%81n-en-Chile.pdf>

Grupo Banco Mundial. (2020). La Construcción de Viviendas en Madera en Chile un Pilar para el Desarrollo Sostenible y la Agenda de Reactivación.

<https://documents1.worldbank.org/curated/en/224671607109191179/pdf/The-Construction-of-Timber-Houses-in-Chile-A-Pillar-of-Sustainable-Development-and-the-Agenda-for-Economic-Recovery.pdf>

Mañes-Navarrete, D., Paya-Zaforteza, I., & Redón-Santafé, M. (). Integrating Design for Disassembly in Hybrid Building Structures: A Case Study of an Administrative Building. Disponible en Social Science Research Network (SSRN) 5095842. <<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5095842>>

Ministerio de Medio Ambiente. (2020). Hoja de ruta para un Chile circular al 2040. <https://economiecircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/07/HOJA-DE-RUTA-PARA-UN-CHILE-CIRCULAR-AL-2040-ES-VERSION-COMPLETA.pdf>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2022). Plan emergencia habitacional 2022-2025. <https://www.minvu.gob.cl/wpcontent/uploads/2022/07/Plan%20de%20Emergencia%20Habitacional.pdf>

Ministerio Del Medio Ambiente. Planes Descontaminación Atmosférica. (en vigencia desde el año 2014)

Norma Chilena NCh 3562 de 2019. [Ministerio de Vivienda y Urbanismo]. Gestión de Residuos de construcción y demolición (RCD) - Clasificación y directrices para el plan de gestión. 12 de septiembre de 2019.

Norma Chilena NCh 3744 de 2023. [Instituto Nacional de Normalización]. Términos y definiciones claras de construcción industrializada. 25 de octubre de 2023.

Organización Internacional de Normalización. (2023). Sostenibilidad en edificación y obra civil - Diseño para desmontaje y adaptabilidad - Principios, requisitos y orientación. (UNE.ISO 20887:2023) <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0071512>

Ossio, F., Molina-Ramírez, J., Larraín, H., & Schmitt, C. (2019). Políticas municipales estandarizadas para el manejo sustentable de residuos de construcción y demolición. Propuestas para Chile, 289 pp.

Paterno Gruppo. (2024). Bilancio Di Sostenibilità 2023. https://www.xlamdolomiti.it/wp-content/uploads/2024/11/gp_reportesg2023_gruppo-paterno_xlam.pdf
RCD Economía Circular. (2020). Hoja de ruta RCD economía circular en construcción 2035. <https://construye2025.cl/wp-content/uploads/2022/07/Hoja-de-Ruta-RCD-Economia-Circular-en-Construccion.pdf>

Rothoblaas. (s.f.). Alumega: Connettore a cerniera per costruzioni post and beam. Rothoblaas. <https://www.rothoblaas.it/prodotti/fissaggio/piastre-e-connettori/giunzioni-a-scomparsa/alumega#description>

Rothoblaas. (s.f.). Sustainable buildings worldwide: prefabrication, timber, modularity and DFD. Rothoblaas.

<https://www.rothoblaas.com/blog/edificio-sostenibili-prefabbricati-modulari-e-designed-for-disassembly>

Shorthouse, P. (9 de abril de 2021). Final Report: Circular economy & the built environment sector in Canada. The Delphi Group.

<https://delphi.ca/wp-content/uploads/2021/04/Circularity-in-Canadas-Built-Environment-Final-Report-April-14-2021.pdf>

Simpson Strong-Tie. (2024). Amarres y uniones de tensión: Conectores para la construcción con madera Simpson Strong-Tie.

https://neufertcdn.archdaily.net/uploads/product_file/file/48613/Cat%C3%A1logo_Amarres_y_union_de_tensi%C3%B3n.pdf

Simpson Strong-Tie. (2024). Simpson Strong-Tie Holdowns on Cross-Laminated Timber Panels.

<https://ssttoolbox.widen.net/view/pdf/z8vu5dm1oe/LCHDCLT24.pdf?t.download=true&u=cjmyin>

Simpson Strong-Tie. (s.f.). HDDQ Heavy Holdowns, Quick-Install. Simpson Strong-Tie.

https://www.strongtie.com/sdsscrewholdowns_holdowns/hhdq_holdown/p/hhdq

Unión. (s.f.). Vivienda Industrializada. Entidad Patrocinante Unión.

<https://unionep.cl/vivienda-industrializada/>

World Green Building Council. (s.f.). <https://worldgbc.org/>

*CNT Construcción en nuevos terrenos. Subsidio de hasta 963 UF Son proyectos habitacionales que tienen entre 10 y 160 viviendas. Incluyen urbanización, equipamiento y áreas verdes. La postulación es colectiva

**ODS, en el año 2015 los estados miembros de la ONU, en conjunto con ONGs y ciudadanos de todo el mundo, generaron una propuesta para desarrollar 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales buscan alcanzar de manera equilibrada tres dimensiones del desarrollo sostenible: el ámbito económico, social y ambiental. En consecuencia, se estableció una agenda internacional proyectada hasta el año 2030 que se compone de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenibles y 169 metas.

***ERN, corresponde a la sigla en castellano energías renovables no convencionales y son aquellas que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.