Guía de diseño e industrialización
EN MADERA

Centro UC
de Innovación
en Madera

Ministerio de
Vivienda y
Urbanismo

Gobierno de Chile

CONVENIO DE COLABORACIÓN Y TRANSFERENCIA

Ministerio de Vivienda y Urbanismo

y

Pontificia Universidad Católica de Chile

Guía de Diseño e Industrialización en Madera

Este proyecto se desarrolla en el marco de convenio de Colaboración y Transferencia entre la Pontificia Universidad Católica de Chile y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU).

Primera versión web: Junio 2024

Esta edición ha sido creada por el equipo del Centro UC de innovación en Madera. Todos los derechos reservados. Esta publicación o cualquier parte de la misma no debe ser reproducida en ninguna forma sin el permiso escrito del Centro UC de innovación en Madera

Encargada de Proyecto
Fabiana Lorca - CIM UC

Colaboradores
Leonardo Vidal
Susana Jara - MINVU
Jorge Calderón - MINVU
Guillermo Calderón - MINVU
Paula Olivares - MINVU

Ilustración
Macarena Sandoval

Diseño y diagramación
Vanessa Naranjo

Revisión de estilo
Gabriel Aldea

Centro de Innovación en Madera UC (CIM UC)
Dirección: Centro de Innovación UC Anacleto Angelini, Piso 7, Santiago, Chile.
Email: contactocim@uc.cl
www.madera.uc.cl

Agradecimientos

Casas Florida
Prefabricadas Premium
Hilam
Niuform
Viviendas prefabricadas Andes
Nueva San José
Comercial Rengalil
Timber
Tronconoble
Casas Río Bueno
Easywood

ÍNDICE

Glosario **7**

Acrónimos **9**

Introducción **10**

PARTE I **14**

1. Construcciónindustrializada en madera 15
1.1 ¿Qué es la construcción industrializada? 15
1.2 ¿Por qué industrialización en madera? 17
1.3 Estado de la industria 19
1.4 Niveles de prefabricación de un elemento 22
1.5 Sistemas constructivos prefabricados en madera 24
1.5.1 Entramado Ligero: Sistema Marco Plataforma 24
1.5.1.1 Paneles 24
1.5.1.2 Módulos 25
1.5.1.3 POD's 26
1.5.2 Madera masiva: CLT 26

2. Consideraciones generales en el diseño y prefabricación de elementos para proyectos industrializados 28
2.1 Entrega integrada de proyectos (IPD): Un cambio de paradigma 28
2.1.1 Participación temprana 29
2.1.2 Participación del mandante 32
2.1.3 Comunicación continua 32
2.1.4 Toma de decisiones colaborativa 33
2.1.5 Resolución temprana de problemas 36
2.1.5.1 Metodología BIM: Modelado de información para la construcción 37
2.1.5.2 Principios de la Metodología Lean 39
2.2 Aplicación del enfoque DfMA (Design for Manufacture and Assembly) para la optimización del proceso 40
2.2.1 Estandarización 42
2.2.2 Personalización 43
2.2.3 Escalabilidad 44
2.2.4 Optimización 45

3. Etapas de la construcción industrializada 46
3.1 Diseño y Planificación 47
3.1.1 Definición estratégica 47
3.1.2 Preparación y orientación 47
3.1.3 Flujo de trabajo de diseño a prefabricación 48
3.1.3.1 Desarrollo de diseño 48
3.1.3.2 Design Freeze 49
3.1.4 Preparación de modelos BIM 50
3.1.5 Detección de interferencias 50

3.1.6 Desarrollo de detalles y documentación para prefabricación 50
3.1.7 Aprobación de diseño 51
3.2 Prefabricación 53
3.2.1 Fabricación de elementos 53
3.2.1.1 CAD/CAM madera 53
3.2.1.2 Planos de fabricación 54
3.2.2 Control de calidad 55
3.2.3 Embalaje 57
3.2.4 Documentación para montaje 57
3.3 Transporte 58
3.3.1 Transporte 58
3.3.2 Control de calidad 58
3.4 Montaje 59
3.5 Construcción en el sitio 60
3.5.1 Inspección final 60
3.5.2 Entrega al cliente o usuario final 60
3.6 Entrega de información para mantención, operación y desmontaje 61
3.6.1 Documentación As-built 61
3.6.2 Documentación final para operación y mantención 62
3.6.3 Desmontaje 62

4. El futuro de la industria 63
4.1 Nuevos tipos de relaciones contractuales 63
4.2 Manufactura avanzada 66

PARTE II 68

1. Consideraciones para el diseño de proyectos industrializados 69
1.1 Consideraciones normativas 69
1.1.1 Requerimientos de resistencia al fuego 69
1.1.2 Requerimientos térmicos 71
1.1.3 Requerimientos acústicos 73
1.2 Consideraciones de funcionamiento y desempeño 74
1.2.1 Diseño estructural 74
1.2.1.1 Fundaciones 74
1.2.1.2 Conexiones 75
1.2.2 Diseño de instalaciones 76
1.2.2.1 Eléctricas 78
1.2.2.2 Sanitarias – Aguas lluvia - Reciclaje de agua 79
1.2.2.3 Gas 80
1.2.2.4 Climatización 81
1.2.2.5 Paneles fotovoltaicos y colectores solares 82
1.2.2.6 Sistemas de detección de humo 82
1.2.3 Diseño de envolvente 82
1.2.3.1 Humedad y condensación: Membranas de vapor y humedad 83
1.2.3.2 Calidad del aire y ventilación 84
1.2.3.3 Hermeticidad 85
1.2.3.4 Infiltraciones de aire en Ventanas 86

1.2.3.5 Revestimiento exterior 88
1.2.3.6 Techumbre 89
1.2.3.7 Aspectos críticos en el diseño de envolventes 89
1.3 Consideraciones de calidad 91
1.3.1 Durabilidad 91
1.3.2 Preservación de la madera-grado estructural y clasificación 92
1.3.3 Tolerancias 93
1.3.4 Transporte 95
1.3.4.1 Protección de elementos 96
1.3.4.2 Dimensiones de un camión 97
1.3.4.3 Izaje, carga y descarga 98
1.3.4.4 Estrategias de entrega de elementos o elementos prefabricados 99
1.3.5 Montaje 100
1.3.6 Desmontaje de estructuras 103
2. Reglamentación asociada a proyectos de Vivienda Industrializada tipo 105
2.1 Industrialización 105
2.1.1 Resolución Exenta N°52 105
2.1.2 Resolución Exenta N°59 108
2.1.3 Glosa N°6 – Ley N°21.516 112
2.2 Requerimientos normativos para la vivienda industrializada tipo 112
2.2.1 Estándar higrotérmico para viviendas industrializadas tipo 113
3. Casos de estudio 114
3.1 casos internacionales 114
3.2 casos nacionales 121
Conclusiones y recomendaciones 124
ANEXOS 128
1 Vivienda Industrializada: Programas de vivienda con financiamiento estatal 129
1.1 Fondo solidario de elección de vivienda. Regulado por el D.S. N°49 130
1.2 Programa de habitabilidad rural. Regulado por el D.S. N°10 131
2 Preservación y durabilidad de la madera 133
3 LOD's 134
Bibliografía 136
Índice de Figuras 140

Glosario

Algunos términos incluidos en este glosario presentan las definiciones establecidas en la Norma Chilena NCh3744: Construcción industrializada y prefabricada – Términos y definiciones y pueden considerar definiciones complementarias.

Cadena de suministro: Término genérico que describe a las personas y empresas contractualmente vinculadas que suministran los servicios, materiales, partes, elementos y equipos que se utilizan para fabricar elementos más grandes, ensamblajes y edificaciones completas para un cliente principal.
**Nota: Definición a partir de RIBA[1].*

Elemento: Producto destinado a la construcción que, antes de su instalación, presenta su forma definitiva y es considerado una unidad aislada que forma parte de un elemento.

Construcción industrializada: Forma de construir que busca mejorar el desempeño de la construcción en distintas etapas y áreas de un proyecto, que puede o no incluir prefabricados.

El objetivo de la construcción industrializada es generar mejoras en materias de: productividad, sostenibilidad, gestión de residuos, salud ocupacional, seguridad, plazos, costos, rentabilidad u otras que definan los involucrados en el proyecto.

Construcción de vivienda Industrializada: Acto de ejecutar vivienda en forma industrializada, en planta industrializadora o planta de fabricación, integrando uno o varios componentes, elementos y/o unidades volumétricas en un proceso global de ejecución y montaje, generalmente con el objetivo de acelerar la construcción en terreno y mejorar el desempeño de la construcción en las distintas etapas y áreas de un proyecto que aseguren la calidad, para conformar una parte o la totalidad de la vivienda industrializada, realizando principalmente en el sitio de la obra actividades de montaje y acabado.

Construcción off-site: Obras de construcción desarrolladas fuera del sitio de emplazamiento de la obra.

Construcción on-site: Obras de construcción desarrolladas en el sitio de emplazamiento de la obra.

Elemento: Parte de una construcción en base a elementos o materiales o combinación de ambos. Es prefabricado y su manufactura se realiza en un lugar diferente al emplazamiento de la obra. Puede presentar diferentes grados de prefabricación dependiendo de su nivel de terminación y complejidad.

Estandarización de productos: Aunar características, dimensiones, proceso constructivo y/o de fabricación de elementos y elementos en un proyecto.

Grado de industrialización; nivel de industrialización: Nivel de uso de atributos de la construcción industrializada en un proyecto de construcción.
*Son atributos de la construcción industrializada, la integración temprana de los actores del proyecto, el diseño integrado, la producción seriada, el trabajo repetitivo, la secuencia rítmica, la prefabricación, la tecnología, la digitalización, la metodología BIM, el nivel de estandarización y optimización del diseño, procesos, métodos constructivos, equipamientos y materiales, entre otros.

Just In Time: Planificación para garantizar que las entregas lleguen al sitio solo cuando se necesitan, evitando así los costos adicionales y los riesgos asociados al almacenamiento en el

1. Ostime, Heptonstall, y Cross, «DfMA Overlay to the RIBA Plan of Work. Mainstreaming design for manufacture and assembly in construction».

lugar de la obra, mejorando la eficiencia general de la construcción.
**Nota: Definición a partir de RIBA[2].*

Kit de partes: Sistema de partes separadas fabricadas fuera de sitio, concebidas para ser montadas de manera eficiente en el sitio de emplazamiento. La razón para mantener las partes separadas es permitir un manejo y transporte más eficientes y seguros, y otorgar flexibilidad (en un rango controlado) en su configuración final.

Mejora continua: Sistema formal para mejorar continuamente la calidad de productos, procesos y/o servicios a lo largo del tiempo. Las iniciativas de mejora continua de procesos, especialmente en manufactura y procesos de construcción eficiente, incluyen: calidad; ciclo planificar-hacer-verificar-actuar; 7 herramientas de calidad; auditorías e inspecciones; y Poka-yoke (un término japonés para operaciones de ensamblaje a prueba de errores). Los fabricantes generalmente aspiran a alcanzar niveles de desempeño 'Six Sigma' para obtener altos rendimientos de producción de productos con muchos elementos.
Nota: Definición a partir de RIBA[3].

Métodos modernos de construcción (MMC): Métodos de construcción diseñados para mejorar la productividad y la seguridad, o reducir la necesidad de mano de obra, o ambas cosas. Tiene el objetivo específico de mejorar la eficiencia en comparación con las técnicas habituales. Aunque el término se asocia más comúnmente con la construcción modular fuera de sitio, en realidad incluye muchos otros resultados, incluyendo innovaciones en procesos en el lugar de la obra. Considera 7 categorías*.

*Definidas en conjunto por el Ministerio de Vivienda, comunidades y Gobierno Local del Reino Unido, para mejorar la comunicación.
Nota: Definición a partir de RIBA[4].

Módulo (o unidad volumétrica): Unidad tridimensional con distintos grados de terminación, que constituye un recinto en sí mismo, diseñado modularmente o no, prefabricado, los que se pueden ensamblar e intercambiar entre sí, que puede ser habitable o no.

Montaje: Proceso de instalación en obra de elementos y elementos. Puede considerar el uso de grúa para procesos de izaje.

Panel: Unidad bidimensional con distintos grados de terminación.

Panel abierto: Unidad bidimensional que posee una de sus caras sin cerrar, lo que permite visualizar algunas o todas las capas de materiales contenidas entre elementos del entramado de madera.

Panel cerrado: Unidad bidimensional que posee ambas caras cerradas y no permite visualizar las capas de materiales contenidas al interior. Puede o no contener revestimientos de terminación.

Prefabricación: Proceso constructivo que incorpora a la construcción diferentes elementos y elementos, fabricados antes de su montaje en su posición definitiva en la obra. Se desarrolla en un lugar diferente al emplazamiento de la obra.

POD: Elemento volumétrico prefabricado, completamente terminado en fábrica y completo internamente con servicios de construcción. Los tipos de módulos incluyen baños, salas de ducha, vanitorios de oficina, salas de máquinas y cocinas. Los PODS utilizan principios de construcción volumétrica, pero son más pequeños que las unidades modulares y generalmente se instalan en marcos estructurales tradicionales.
Nota: Definición a partir de RIBA[5].

Producción seriada: Forma de organizar la producción de las obras mediante un procedimiento repetitivo, secuencial y estandarizado.

2. Ostime, Heptonstall, y Cross.
3. Ostime, Heptonstall, y Cross.
4. Ostime, Heptonstall, y Cross.
5. RIBA, «RIBA Plan of Work 2013: Designing for Manufacture and Assembly».

Acrónimos

AEC: *Architecture, Engineering & Construction* (Arquitectura, ingeniería y construcción)

BIM: *Building Information Modeling* (Modelado de información de la construcción)

CAD: *Computer-Aided Design* (Diseño asistido por computador)

CAM: *Computer-Aided Manufacturing* (Manufactura asistida por computador)

CIM UC: Centro de Innovación en Madera de la Universidad Católica

CLT: *Cross Laminated Timber* (Madera contralaminada)

CNC: Control Numérico Computarizado

DfD: *Design for Disassembly* (Diseño para el desmontaje)

DfMA: *Design for Manufacture and Assembly* (Diseño para la manufactura y el montaje)

DITEC: División Técnica de Estudios

IPD: *Integrated Project Delivery* (Entrega integrada de proyectos)

IoT: *Internet of Things* (Internet de las cosas)

JIT: *Just in Time* (Justo a tiempo)

MMC: *Modern Methods of construction* (Métodos modernos de construcción)

LOD: *Level of Development* (Nivel de desarrollo)

LOI: *Level of Information* (Nivel de información)

OSC: *Off-Site Construction* (Construcción fuera de sitio)

SIP: *Structural Insulated Panel* (Panel aislante estructural)

VDC: *Virtual Design and Construction* (Diseño y construcción virtual)

Introducción

El presente documento fue realizado en un esfuerzo conjunto entre Centro UC de Innovación en Madera y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, con el objetivo de dar a conocer las características y beneficios de la construcción industrializada en madera, con especial énfasis en la vivienda social.

En los últimos años, se ha evidenciado un incremento en la crisis de acceso a la vivienda en Chile, de acuerdo a la Encuesta de Caracterización Socioeconómica (CASEN), acrecentado desde el año 2017. Se estima que hasta el 2022 el déficit habitacional en Chile alcanzó las 641.421 viviendas[6], considerando condiciones de allegamiento, hacinamiento y viviendas irrecuperables. Por otro lado, desde el año 2014 se ha observado un aumento en la cantidad de familias que viven en campamentos, con una tendencia significativa al alza desde el año 2019[7]. La evidencia demuestra un fuerte impacto del estallido social de 2019 y la pandemia del COVID-19 en la situación de vulnerabilidad de familias en Chile frente al acceso a la vivienda. Estos antecedentes demuestran la necesidad de implementar políticas públicas que promuevan el acceso a la vivienda, con estrategias innovadoras y colaborativas que permitan abordar este desafío estructural.

En este contexto se enmarca el Plan de Emergencia Habitacional 2022-2025 presentado por el Gobierno, que busca absorber al menos el 40% de la demanda habitacional proyectada, es decir, 260.000 viviendas. El Plan contempla la implementación de distintas estrategias para lograr este objetivo, entre las cuales se encuentra fomentar la construcción industrializada, para orientar la transformación de la industria hacia una con mayores niveles de productividad y eficiencia, a partir de la adopción de la industrialización, la digitalización y nuevas metodologías de trabajo.

El último punto mencionado posee relevancia, debido a los bajos niveles de productividad del rubro de la construcción en Chile, en contraste con otras áreas. Por este motivo, es fundamental generar cambios en la industria, hacia un modelo que genere incrementos en la productividad y que permita abordar el problema de forma integral, incorporando otras problemáticas como la generación de residuos y emisiones y aprovechando las ventajas del desarrollo tecnológico asociado a la construcción.

La construcción corresponde al rubro responsable del 37% de las emisiones globales, considerando la operación y los materiales utilizados en la construcción[8], situación que en el marco del compromiso de Chile carbono neutral al 2050, refuerza la necesidad de transformar la manera en que construimos actualmente, hacia un modelo que reduzca los impactos medioambientales de la construcción. En este contexto, la industrialización entrega la oportunidad de tener un mayor control sobre los procesos y planificar con mayor precisión cada aspecto de una obra, incluyendo la calidad de las edificaciones, los residuos generados, la eficiencia y reducción de trabajos rehechos.

La constante evolución de la construcción industrializada a nivel mundial nos impulsa a repen-

6. Déficit cero y Centro UC Politicas Publicas, «Déficit Habitacional: ¿Cuántas familias necesitan una vivienda y en qué territorios? - Boletín 1: Estimación y caracterización del déficit habitacional en Chile».
7. TECHO-Chile y Fundación Vivienda, «Catastro nacional de campamentos 2020-2021».
8. United Nations Environment Programme, «Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission»

sar y redefinir los paradigmas establecidos en la industria chilena. En este contexto, emerge la necesidad de expandir los alcances de la prefabricación, hacia nuevas tecnologías y metodologías de trabajo que plantea la construcción industrializada. Esta guía se propone como una plataforma para catalizar este cambio, destacando soluciones constructivas en madera que, si bien aún no han alcanzado la difusión masiva en nuestra industria, encierran un potencial transformador significativo para el país, como ocurre en Noruega, Suecia o Finlandia.

A partir de la incorporación de nuevas tecnologías y procesos constructivos, aparece la oportunidad de integrar nuevos desafíos en la construcción, como son aquellos vinculados con la construcción de un país más sostenible y responsable con el medioambiente, entre los cuales se encuentran las consideraciones sobre el ciclo de vida de una edificación, su reutilización o la medición de su huella de carbono.

A partir del potencial que exhibe la industrialización para el contexto nacional, se busca que este documento permita acercar conceptos clave para comprender las diversas variables asociadas a la construcción industrializada. A través de él se busca orientar a profesionales de la construcción en torno al diseño en el contexto de la industrialización y las consideraciones asociadas a su adopción, en contraste con un proceso constructivo tradicional. En particular, se aborda la vivienda social desde la perspectiva de la industrialización y los requerimientos particulares que presenta este tipo de proyectos, con el objetivo de potenciar los beneficios de su incorporación y anticipar situaciones críticas del proceso.

Figura 1. *Marco conceptual de la construcción industrializada de viviendas. Basado en la propuesta de Lessing (2006)*

La guía aborda diversos aspectos de la industrialización que son indispensables conocer para el desarrollo de diseño de proyectos, desde conceptos clave y fundamentos, etapas de este proceso, consideraciones para el diseño, requerimientos, aspectos normativos, hasta la revisión de casos de estudio que permiten evidenciar en la práctica los conceptos presentados y las diferentes aproximaciones existentes hacia un proyecto industrializado con elementos prefabricados.

Debido a la multiplicidad de aspectos y dimensiones que componen la construcción industrializada de viviendas, es fundamental comprender cada una de las variables, su vinculación con las demás y sus impacto en el éxito del resultado final.

El documento considera la definición de industrialización propuesta por Lessing[9], quien plantea la construcción industrializada de viviendas como un "proceso de construcción minucioso, desarrollado con una organización adecuada para la eficiencia de la gestión, planificación y control de las actividades involucradas; flujos, recursos y resultados para el cual se utilizan elementos altamente desarrollados con el fin de crear el máximo valor para el cliente". A partir de este concepto, se destacan los aspectos que deben ser incorporados para mejorar los estándares de la construcción industrializada de viviendas en Chile.

El documento se divide en dos partes, con objetivos diferentes y que pueden ser leídas de manera independiente. La primera parte introduce aspectos teóricos que entregan información fundamental para la comprensión del funcionamiento de este tipo de proyectos, mientras que la segunda parte proporciona información práctica para el proceso de diseño, con consideraciones asociadas a cada aspecto que implica un proyecto.

La primera parte se divide en cuatro capítulos. El primer capítulo presenta la información fundamental para una primera aproximación al proyecto, abordando conceptos generales de la construcción industrializada, las ventajas del uso de la madera y las etapas que componen el proceso de la construcción, en contraste con las etapas y tiempos de un proyecto tradicional. Además, se describen los dos sistemas constructivos industrializados en madera y los niveles de prefabricación que es posible alcanzar con cada uno. De esta manera, se busca orientar respecto a la elección de sistema constructivo y el nivel de prefabricación, en base a las ventajas y desafíos que presenta cada alternativa, que tendrán que ser evaluados en función de los objetivos y condiciones del proyecto.

La guía aborda principalmente la edificación con elementos de entramado ligero en marco plataforma, debido a que corresponde a un sistema de construcción tradicional y puede ser utilizado para viviendas sociales en Chile, a diferencia de otros sistemas constructivos que pueden considerar también procesos de prefabricación pero que no poseen esta clasificación, como el CLT o paneles SIP. Dentro de estos dos sistemas, se presenta también casos de CLT, debido a su potencial para la construcción en altura en madera. A la fecha se encuentran en curso diversas iniciativas que buscan cambiar la clasificación de este sistema constructivo, para así permitir su uso en proyectos de vivienda con financiamiento estatal.

El segundo capítulo aborda los fundamentos y conceptos clave en la construcción industrializada, presentando la transformación de la construcción hacia un tipo de entrega integrada de proyectos, con altos niveles de colaboración entre equipos y las estrategias para llevar a cabo esto y desarrollar exitosamente un proyecto. Además, se presenta el enfoque DfMA,

9. Lessing, «Industrialised house-buildings-concept and processes».

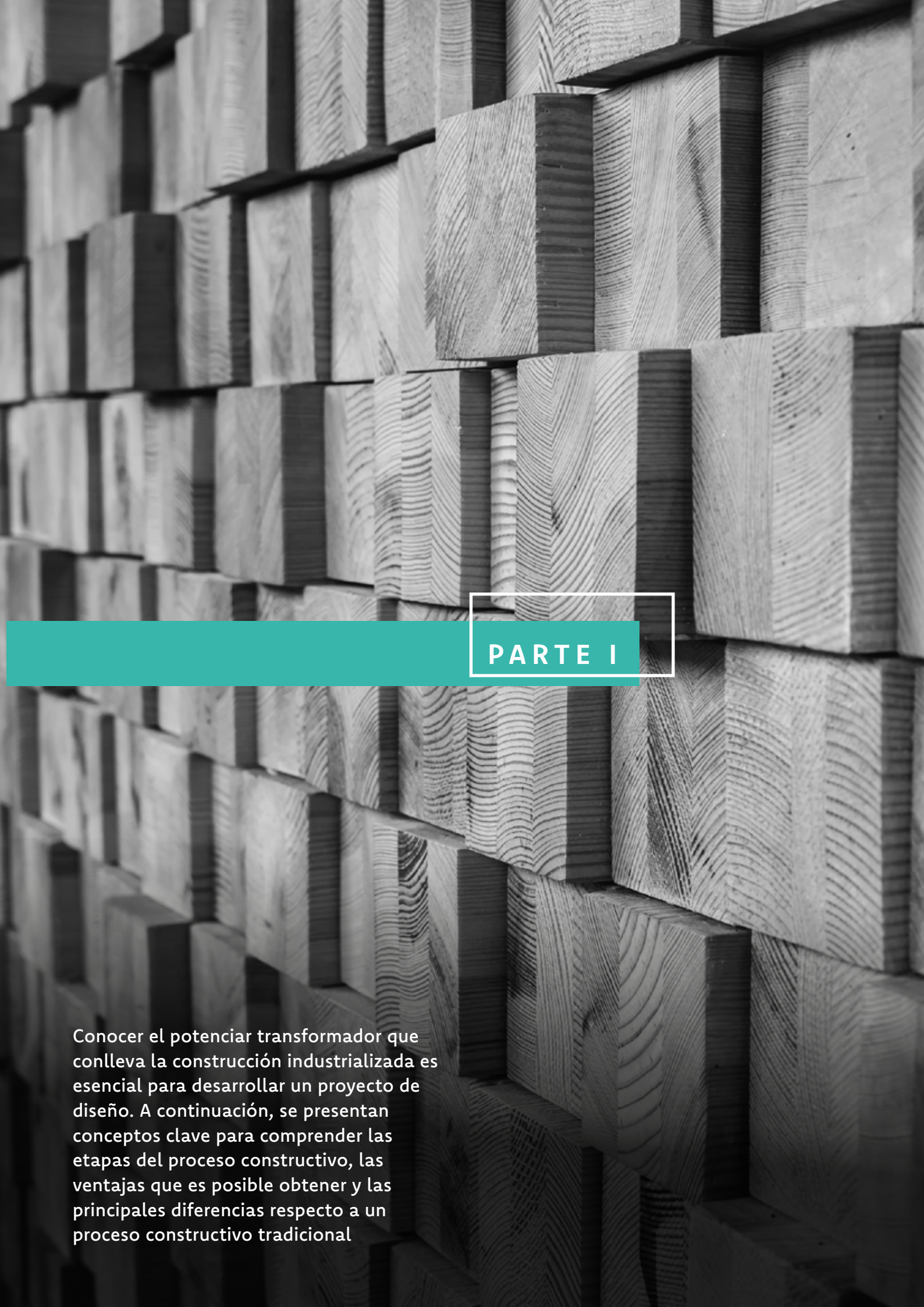
que resulta fundamental para la optimización del proceso, aumentar la eficiencia del proyecto y aprovechar las ventajas que posee la industrialización con elementos prefabricados. En tercer lugar, se presentan las etapas que componen la construcción industrializada y los flujos de trabajo que se desarrollan en este contexto. Finalmente, con el fin de evidenciar el panorama que se espera hacia el futuro, se expone la necesidad de avanzar hacia nuevos tipos de relaciones contractuales que propicien las condiciones para desarrollar un proyecto industrializado con éxito y se identifican algunos conceptos asociados a nuevas tecnologías de la transformación

La segunda parte expone en su primer capítulo las consideraciones constructivas para el diseño de proyectos industrializados y la prefabricación de sus elementos, que posibilitan su factibilidad y desarrollo. Cada uno de los aspectos y consideraciones revisadas podrían estar presentes en proyectos tradicionales, sin embargo, en un proceso industrializado presentan particularidades que es necesario tener en cuenta para la optimización del proyecto.

Con el fin de contextualizar los contenidos entregados, el segundo capítulo expone los lineamientos a nivel nacional respecto a los requerimientos para el desarrollo de proyectos de vivienda industrializada. Se presenta el procedimiento de aprobación de empresas industrializadoras y las condiciones y mecanismos para el ingreso de proyectos de viviendas industrializadas tipo. Ambos procedimientos se encuentran descritos en la Resolución Exenta N°52 y N°59 respectivamente. Junto con esto, se expone el estándar higrotérmico definido para viviendas industrializadas.

En el tercer capítulo, se presentan casos de estudio, que exponen diversas experiencias en proyectos de vivienda industrializada, tanto en Chile como en el extranjero, que ejemplifican la implementación de este enfoque, permiten evidenciar buenas prácticas y también soluciones innovadoras implementadas. Se exponen con el fin de colaborar en la toma de decisiones a partir de lecciones aprendidas y propiciar la mejora continua en proyectos futuros. Los casos expuestos evidencian soluciones habitacionales edificadas a partir de diferentes tipos de elementos prefabricados: paneles de entramado ligero, módulos de entramado ligero, paneles de CLT, módulos de CLT y un caso que consideró el diseño para desmontaje.

Como se menciona a lo largo del documento, esta guía se orienta a una transformación de la industria, a través de diversos conceptos y experiencias que abren el campo de posibilidades hacia un futuro con mayores índices de productividad, mejores soluciones habitacionales, una mayor responsabilidad con el medioambiente y un entorno de mayor colaboración e integración entre los diferentes actores involucrados en el proceso de la construcción.



PARTE I

Conocer el potenciar transformador que conlleva la construcción industrializada es esencial para desarrollar un proyecto de diseño. A continuación, se presentan conceptos clave para comprender las etapas del proceso constructivo, las ventajas que es posible obtener y las principales diferencias respecto a un proceso constructivo tradicional

1

Construcción industrializada en madera

1.1

¿Qué es la construcción industrializada?

La construcción industrializada es un enfoque innovador en la industria de la construcción que implica el uso de elementos y componentes prefabricados en lugar de construir una estructura de manera tradicional en el sitio. Este método se basa en la prefabricación de partes del proyecto, que pueden corresponder a la estructura o incluso contener elementos de instalaciones y terminación, que luego se montan en el sitio de emplazamiento.

La industrialización se diferencia de la prefabricación en que posee un enfoque amplio y sistémico, que considera todas las etapas del proceso, desde la planificación hasta la etapa de construcción en el sitio, e incluso el desmontaje y reutilización de estructuras. Por este motivo, implica la participación de los diversos equipos que colaboran en un proyecto de construcción, como el equipo de diseño, ingeniería estructural, especialistas, empresa industrializadora, empresa constructora, equipos de transporte y montaje, entre otros.

La prefabricación corresponde a la fabricación de elementos constructivos en un lugar diferente al sitio de emplazamiento y dependiendo de la cantidad de elementos integrados se va a clasificar el nivel de prefabricación de un elemento. Sin embargo, independiente del nivel de prefabricación que se alcance, no necesariamente corresponderá a un incremento en el nivel tecnológico empleado para construir o un incremento en la eficiencia del proceso.

Si bien la industrialización puede implicar prefabricación, se plantea que la construcción industrializada de viviendas es un concepto más amplio y considera ocho aspectos clave[10]: planificación y control de procesos, sistemas técnicos avanzados, prefabricación de elementos, relaciones duraderas entre los involucrados, gestión integrada de la cadena de suministro, atención centrada en el cliente, uso de tecnologías de la información y comunicación, así como la evaluación sistemática del desempeño y la aplicación de experiencias pasadas.

Debido al enfoque que plantea la industrialización, se destacan beneficios como mejoras en la productividad, sostenibilidad, gestión de residuos, salud ocupacional, seguridad, plazos, costos, rentabilidad, entre otros[11].

10. Lessing, Stehn, y Ekholm, «Industrialised housing: Definition and categorization of the concept».

11. Instituto Nacional de Normalización, «NCh3744: Construcción industrializada y prefabricada - Términos y definiciones».

Dependiendo del nivel de prefabricación que consideren los elementos utilizados, la edificación implicará también trabajos en el sitio, por lo tanto, un edificio industrializado que considere elementos o elementos prefabricados implicará la fabricación en planta, su traslado y montaje en el sitio de emplazamiento.

La industrialización se vincula directamente con la tecnología disponible y las posibilidades que puede entregar al proceso, tanto para el equipo de diseño como para los responsables de la prefabricación y montaje de la obra. La automatización de procesos en las diferentes etapas permite mejoras tanto en la gestión, como en la logística y en aspectos constructivos y plazos que es posible alcanzar con economías de escala y la aplicación de la estandarización a nivel de procesos como de diseño.

A partir de la implementación de la prefabricación, se han visto impactos positivos en la productividad, a través de mejoras en la maquinaria, herramientas para la fabricación y la tecnología[12], sin embargo, únicamente este factor no es el motivo de estas mejoras, sino que en casos donde se han incorporado además tecnologías de información.

La adopción de métodos de producción en masa, con mayores niveles de estandarización y trabajo en fábrica, podría llevar a un aumento de productividad de entre cinco a diez veces mayor[13], por lo tanto, potenciar la industrialización se presenta como una fuerte estrategia para enfrentar el problema habitacional en Chile. La construcción industrializada en madera se caracteriza por su velocidad de construcción y calidad, por lo tanto, al fabricar elementos en un entorno controlado se pueden reducir los retrasos debidos a condiciones climáticas desfavorables y otras variables impredecibles en el sitio de construcción. Esto puede resultar en el cumplimiento de plazos y una finalización más rápida del proyecto.

La escalabilidad juega un rol importante dentro de la industrialización, debido a que puede significar reducciones en los plazos en la medida en que el número de proyectos a ejecutar es mayor, mientras que las condiciones son diferentes cuando se ejecuta un proyecto único o proyectos con alta personalización[14]. Por otro lado, el trabajo simultáneo de equipos, donde la prefabricación de elementos se desarrolla en paralelo con la ejecución de obras en el sitio, como fundaciones, permite la reducción de plazos de construcción.

12. Goodrum, Zhai, y Yasin, «Relationship between Changes in Material Technology and Construction Productivity».
13. McKinsey Global Institute, «Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity».
14. Smith, *Prefab Architecture*.

1.2
¿Por qué industrialización en madera?

Figura 2. *Montaje de módulo Torre Peñuelas en fábrica*

La evidencia internacional indica que es posible ejecutar proyectos industrializados con diversas materialidades, sin embargo, la madera posee ventajas vinculadas con las particularidades de la prefabricación.

En primer lugar, la madera posee gran compatibilidad con procesos de fábrica basados en CNC que sustentan la prefabricación[15], además, la posibilidad de la madera de poder ser maquinada en seco permite una construcción más rápida y eficiente, ya que no requiere tiempos de secado, fraguado o curado como otros materiales, lo que acelera el proceso de prefabricación.

En comparación con otros materiales de construcción, la madera posee un bajo peso, lo que significa una ventaja para el transporte y manejo de los elementos en la fábrica y en el sitio. Esta característica propicia la ejecución de módulos para la construcción de edificios. El bajo peso significa también la necesitad de fundaciones de menores dimensiones y por lo tanto puede derivar en una reducción de costos.

Por otro lado, la prefabricación permite un mayor control de calidad, ya que los elementos de madera pueden producirse con una precisión milimétrica. Esto facilita que los elementos se ajusten perfectamente cuando se ensamblan en el sitio, reduciendo los errores de construcción. Por otro lado, el trabajo en madera entrega una mayor flexibilidad para intervenir los elementos si se desea cortar para reparar o corregir errores.

15. ARUP, «Rethinking Timber Buildings».

Cuando la obra considera la prefabricación de elementos, se puede calcular con precisión la cantidad de material necesario para cada elemento. Esto minimiza el desperdicio de madera, ya que los cortes y las dimensiones de los elementos prefabricados se ajustan cuidadosamente para utilizar la mayor parte del material disponible, reduciendo así los recortes y desechos de corte. Debido a que los elementos prefabricados incluyen estructura, instalaciones e incluso elementos de terminación, hay menos necesidad de realizar cortes y ajustes en obra. Esto reduce la cantidad de desechos de construcción generados en obra.

Aunque la inversión inicial en la construcción industrializada en madera puede ser un poco mayor debido al costo de la prefabricación de elementos, los beneficios en términos de reducción de tiempo de construcción y la reducción de mantenciones a largo plazo pueden equilibrar o incluso superar esos costos adicionales, sin embargo, depende de la correcta planificación y coordinación de cada proyecto.

A nivel nacional, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo considera la industrialización como uno de los pilares de desarrollo para incrementar los niveles de productividad en la construcción de vivienda social y de esta manera, colaborar en el Plan de Emergencia Habitacional. En particular, con la construcción industrializada en madera se avanza hacia una industria más sustentable, productiva y competitiva y con impactos positivos en los ámbitos social, económico y medioambiental. A partir de iniciativas como: la estandarización de elementos y procesos, el desarrollo y promoción de proveedores y la generación de proyectos demostrativos se busca fomentar la construcción industrializada en el país, propiciar un mejor entorno para la prefabricación e industrialización, potenciar la cadena de valor y visibilizar los resultados de proyectos ya ejecutados que muestren las lecciones aprendidas de cada proyecto.

La madera en particular, es un material de construcción sostenible, siempre que provenga de bosques plantados con certificaciones de manejo sustentable, como ocurre con cerca del 70% de la madera industrial producida en Chile[16]. La construcción industrializada en madera puede reducir aún más su huella de carbono al minimizar los residuos y optimizar el uso de recursos naturales, además de favorecer el desarrollo de construcciones menos ruidosas y disruptivas con su entorno, lo que puede ser beneficioso en entornos urbanos o sensibles al ruido.

16. Papageorgiou y Massai, «Los Bosques de Chile, Pilar para un desarrollo inclusivo y sostenible».

1.3
Estado de la industria

De acuerdo al Informe Productividad en el sector de la construcción[17], la productividad de la construcción en países OCDE es más del doble de la chilena, mientras que la productividad de la construcción en Chile es menor a la de los otros sectores del resto de la economía. Por otro lado, de acuerdo con el *benchmark* realizado por Matrix en edificación, las edificaciones chilenas presentan un promedio de 0,24 m² persona-día, en contraste con la muestra internacional, donde la media es de 0,37 m² por persona-día. En este contexto, se releva la necesidad de transformar la forma de construir en Chile e implementar nuevas metodologías constructivas que favorezcan el incremento de la productividad, en línea con un desarrollo sostenible.

De acuerdo al Informe Productividad en el sector de la construcción, la adopción de la industrialización en la construcción se plantea como una respuesta a problemas de coordinación, calidad, sobrecostos y excesos de tiempos en otros países, quienes incorporaron estas metodologías para mejorar la productividad en la industria. Ante esta evidencia, se evidencia su implementación como una alternativa a para mejorar la productividad y otros aspectos de la construcción.

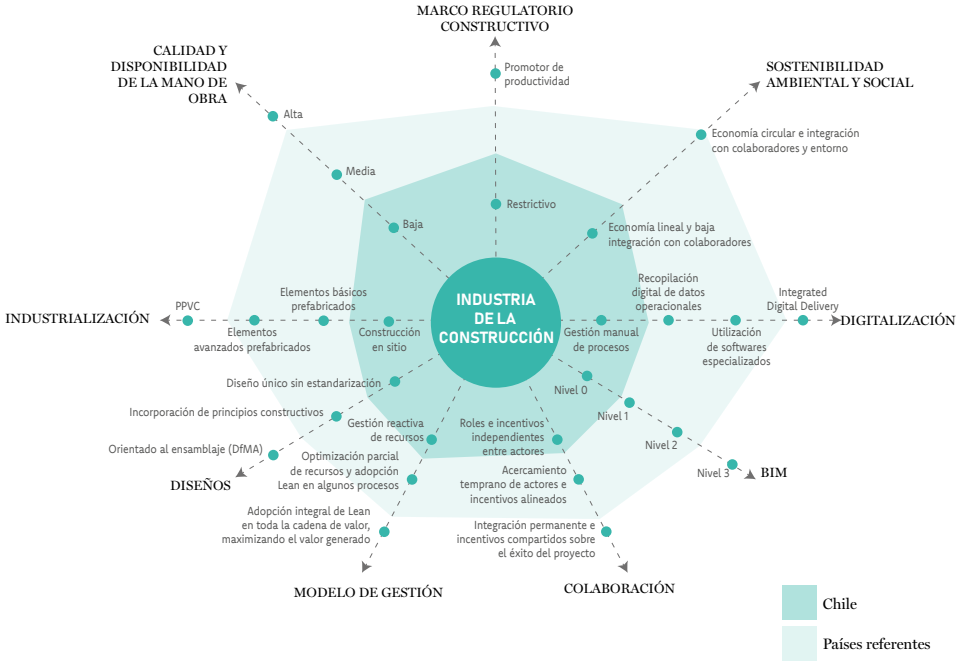


Figura 3. *Dimensiones clave y diagnóstico de la industria*

17. Comisión Nacional de Productividad, *Productividad en el sector de la construcción*.

Como se observa en la Figura 2, la industrialización corresponde a una de las dimensiones clave en el desarrollo de la industria, junto con diseños, calidad y disponibilidad de la mano de obra, marco regulatorio constructivo, sostenibilidad ambiental y social, digitalización, BIM, colaboración y modelo de gestión. En comparación con países referentes existe una importante brecha en todos los aspectos, que debe ser cubierta para mejorar la productividad de la industria.

El estudio[18] releva la importancia del diseño, gestión y ejecución de proyectos desde etapas tempranas del proceso para incrementar los niveles de eficiencia de proyectos. La industrialización se vincula directamente con estos aspectos, al presentar nuevas metodologías para su ejecución.

Actualmente en Chile, el Plan de emergencia habitacional planteado por el Gobierno contempla la construcción industrializada como estrategia para reducir el déficit habitacional, considerando la alianza público – privada para avanzar en que las empresas adopten nuevas tecnologías, exista mano de obra calificada para implementar la construcción industrializada, la normativa se actualice y se capaciten los profesionales para llevar a cabo las inspecciones de obras industrializadas.

De acuerdo al Catastro de capacidades y brechas de Industrialización de Prefabricadoras en madera de mediana y baja tecnología[19], que consideró la evaluación de 23 empresas a lo largo del territorio nacional, en Chile se presentan cuatro niveles de industrialización: alto, medio, bajo y muy bajo, definidos de acuerdo a ocho áreas: Planificación y Control de Procesos, Sistemas Técnicos Desarrollados, Construcción Off-site, Relaciones entre Participantes, Logística Integrada en el Proceso de Construcción, Enfoque en el Consumidor, Tecnologías de la Información y Comunicación y Medición Sistemática y Reutilización de la Experiencia.

El estudio determinó la existencia de 4 *clusters* o grupos, determinados por la similitud de características:

Nivel de Industrialización (NI)	Cluster
Alto	C1
Medio	C2
Bajo	C3
Muy bajo	C4

Como detalla el informe, los grupos reúnen empresas con características similares. Se presenta una descripción general de los grupos, que puede no ser representativa necesariamente de todas las empresas que lo componen, pero que da cuenta del análisis comparativo entre grupos:

NI alto - C1: Se caracteriza por la complejidad y completitud de los elementos prefabricados y por entregar viviendas montadas y finalizadas. La etapa de prefabricación comprende un avance de 50% del valor final de la vivienda, entre elementos prefabricados, ductos de instalaciones, terminaciones y elementos estandarizados. Sus labores abarcan todas las etapas del proyecto, incluyendo la construcción en el sitio, lo que les permite hacer controles de calidad a lo largo del proceso.

NI medio - C2: La oferta considera como producto final viviendas prefabricadas y en algunos casos incluye el montaje. La prefabricación considera paneles compuestos parcialmente por instalaciones y/o terminaciones. La prefabrica-

18. Matrix Consulting, «Estudio de productividad: Impulsar la productividad de la industria de la Construcción en Chile a estándares mundiales».
19. MINVU y CIM UC, «Catastro de capacidades y brechas de industrialización de prefabricadoras en madera de mediana y baja tecnología».

ción puede corresponder al 25% o hasta el 50% del valor final de la vivienda. Las empresas asumen entre 3 a 5 etapas del proyecto.

NI bajo - C3: El producto ofrecido corresponde a una vivienda prefabricada no montada. La prefabricación considera paneles en obra gruesa, sin instalaciones ni terminaciones y su alcance puede ser aproximadamente de un 15% del valor final de la vivienda. Las empresas asumen entre 3 a 5 etapas del proyecto.

NI muy bajo - C4: El producto ofrecido corresponde a viviendas prefabricadas montadas y totalmente finalizadas, sin embargo, la prefabricación solamente comprende la ejecución de paneles en obra gruesa y su alcance es de un 10% del valor final de la vivienda. Las empresas asumen las 5 etapas del proyecto, donde la mayoría de las tareas corresponden a trabajos en el sitio.

Como se expone en el gráfico, la mayor cantidad de empresas se ubica en los grupos C3 y C4, es decir, poseen un nivel de industrialización bajo o muy bajo y solamente un 13% (cinco empresas) se ubican en el cluster C1, con un alto nivel de industrialización.

A partir de los resultados del catastro, se observa que para la industrialización en madera aún existe una brecha de desarrollo en la cual es necesario avanzar para tomar las ventajas que puede entregar. Dentro de las brechas más significativas se destaca principalmente el área de tecnologías de la información y la comunicación (uso de software, digitalización e interoperabilidad por etapas y usos BIM), seguida por relaciones entre participantes (etapas de desarrollo del proyecto que la empresa ofrece como servicio, asociaciones en distintas etapas de desarrollo del proyecto, integración entre etapas del proyecto, integración en tecnología e información, integración de la información según etapas del proyecto y grado de madurez BIM).

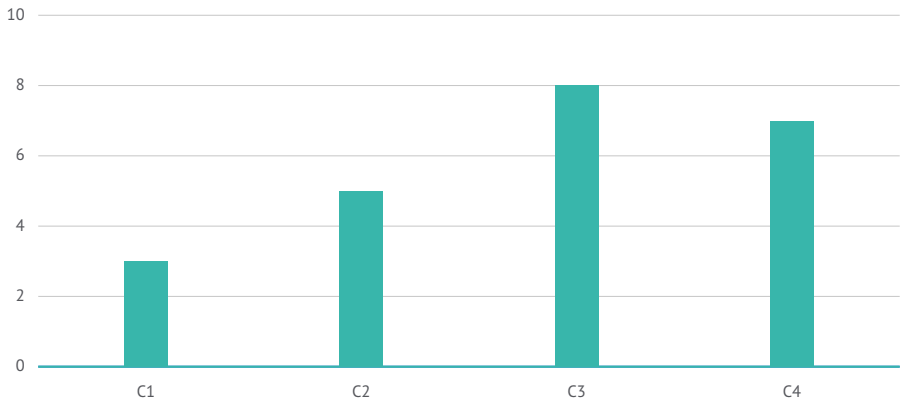


Figura 4. *Cantidad de empresas por cluster*

1.4
Niveles de prefabricación de un elemento

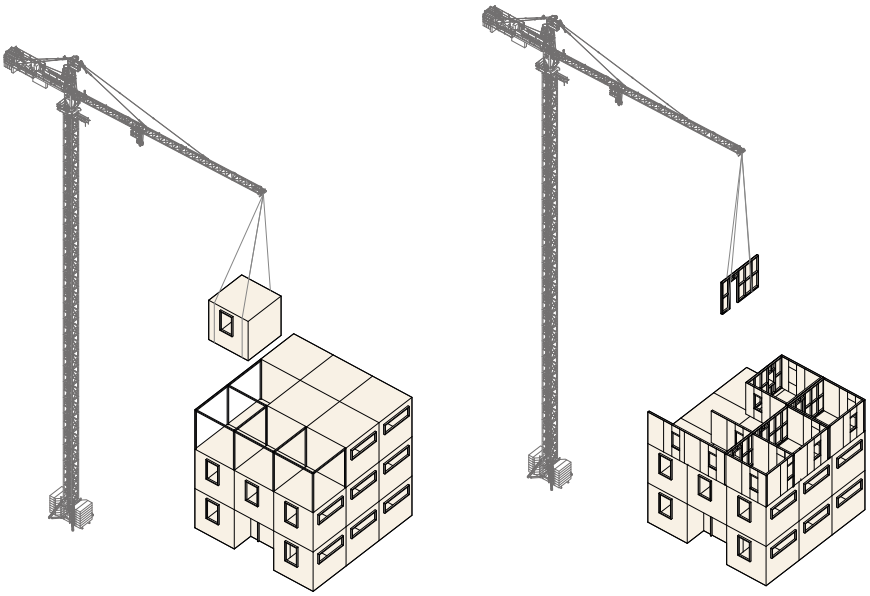


Figura 5. *Sistemas prefabricados*

El nivel de prefabricación de un elemento tiene relación con su nivel de avance en relación al total de la obra y en la medida en que el elemento corresponda a un mayor porcentaje de la obra, los trabajos de construcción en el sitio se reducen.

Una edificación puede considerar su ejecución con sólo un solo tipo de elemento o puede considerar la combinación de diversos tipos de elementos para diferentes partes del edificio, dependiendo de las necesidades.

De acuerdo a la Norma chilena NCh 3744, los elementos y elementos prefabricados se pueden clasificar según dimensiones y nivel de terminación, donde el nivel básico corresponde a un elemento lineal en obra gruesa, mientras que el máximo nivel de complejidad corresponde a unidades volumétricas terminadas.

Dimensiones del elemento o elemento prefabricado:

- Lineal: Vigas y columnas.
- Bidimensional: Paneles
- Tridimensional: Módulos
- Recinto básico: Pods

Nivel de terminación del elemento o elemento prefabricado:

- Obra gruesa
- Obra gruesa + instalaciones o terminaciones
- Obra gruesa + instalaciones + terminaciones

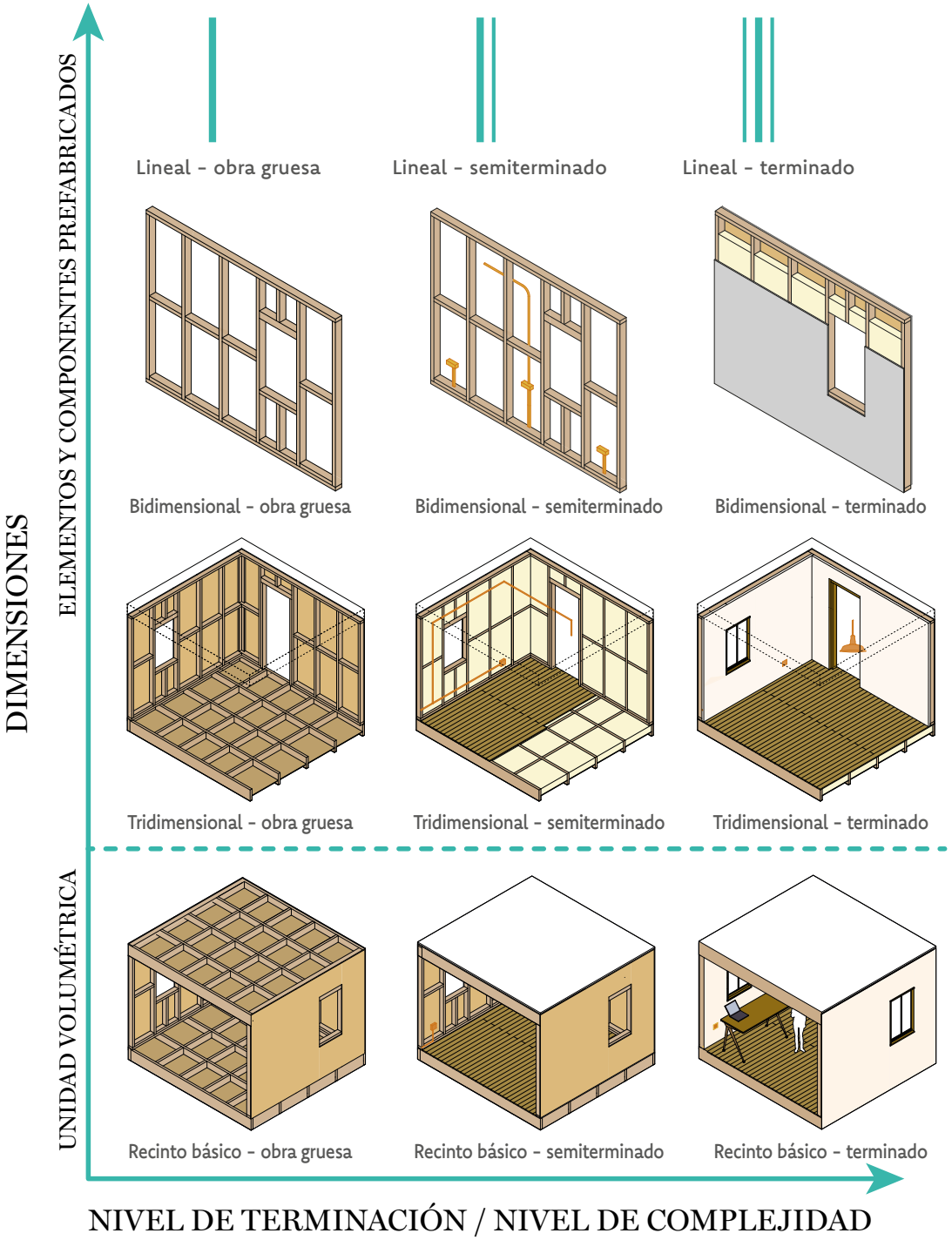


Figura 6. *Clasificación de elementos y elementos prefabricados*

1.5
Sistemas constructivos prefabricados en madera

1.5.1 Entramado Ligero: Sistema Marco Plataforma

El sistema constructivo de más amplio uso en Chile es el marco plataforma, un sistema de entramado ligero en madera que permite la edificación de muros, pisos, entrepisos, cubiertas y cerchas. Corresponde al sistema en madera más utilizado en Chile[20] y se considera un sistema tradicional según el MINVU por contar con normativa de diseño estructural en Chile. NCh1198.

Los tipos de elementos prefabricados que es posible alcanzar con entramado ligero son variables, pero se destaca la edificación en 2D y 3D, es decir, paneles y módulos respectivamente. Ambos tipos de elementos poseen tres niveles de terminación o complejidad, considerando desde obra gruesa solamente, hasta la consideración de instalaciones y materiales de terminación.

1.5.1.1 Paneles

Corresponden a elementos bidimensionales (no volumétricos), que no crean espacios por sí mismos, sino que en conjunto con otros paneles o elementos. Se clasifican en paneles abiertos, paneles semi abiertos y paneles cerrados. El uso de paneles permite la ejecución de muros, pisos ventilados, entrepisos y techumbres.

Como se detalla en la figura 5, pueden alcanzar diferentes niveles de terminación:

Obra gruesa
Obra gruesa + Instalaciones o Terminaciones
Obra gruesa + Instalaciones + Terminaciones

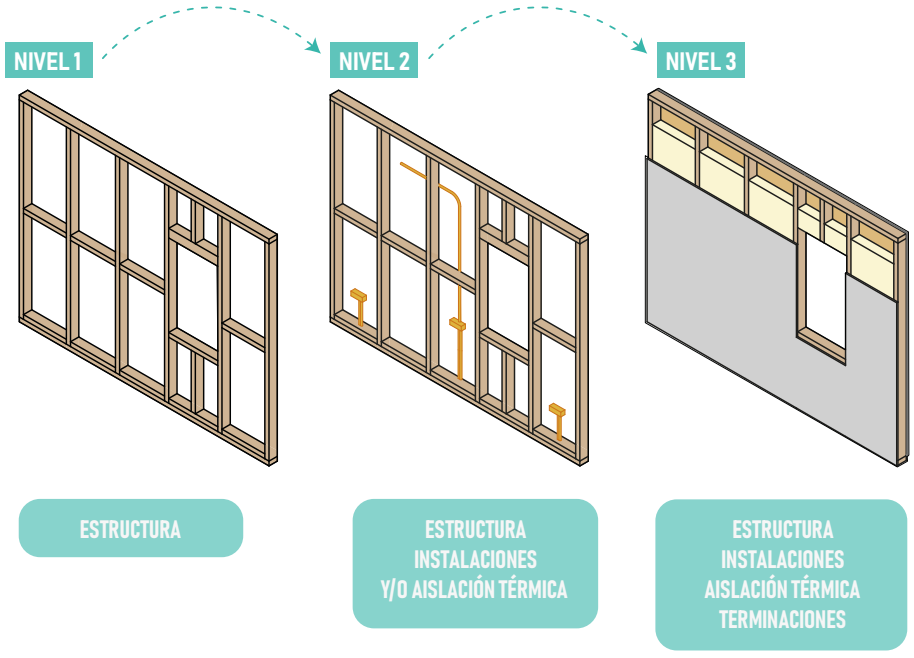


Figura 7. *Clasificación de paneles prefabricados*

20. Banco Mundial, *La construcción de viviendas en madera. Un pilar para el desarrollo sostenible y la agenda de reactivación.*

1.5.1.2 Módulos

Corresponden a unidades tridimensionales (volumétricas) con capacidades estructurales, que crean espacios por sí mismas y no necesariamente corresponden a una obra terminada. Sus características permiten su aplicación en edificaciones con espacios repetitivos, para dar lugar a edificios habitacionales, hoteles, espacios educacionales, entre otros.

Pueden alcanzar diferentes niveles de terminación:

Obra gruesa
Obra gruesa + Instalaciones o Terminaciones
Obra gruesa + Instalaciones + Terminaciones

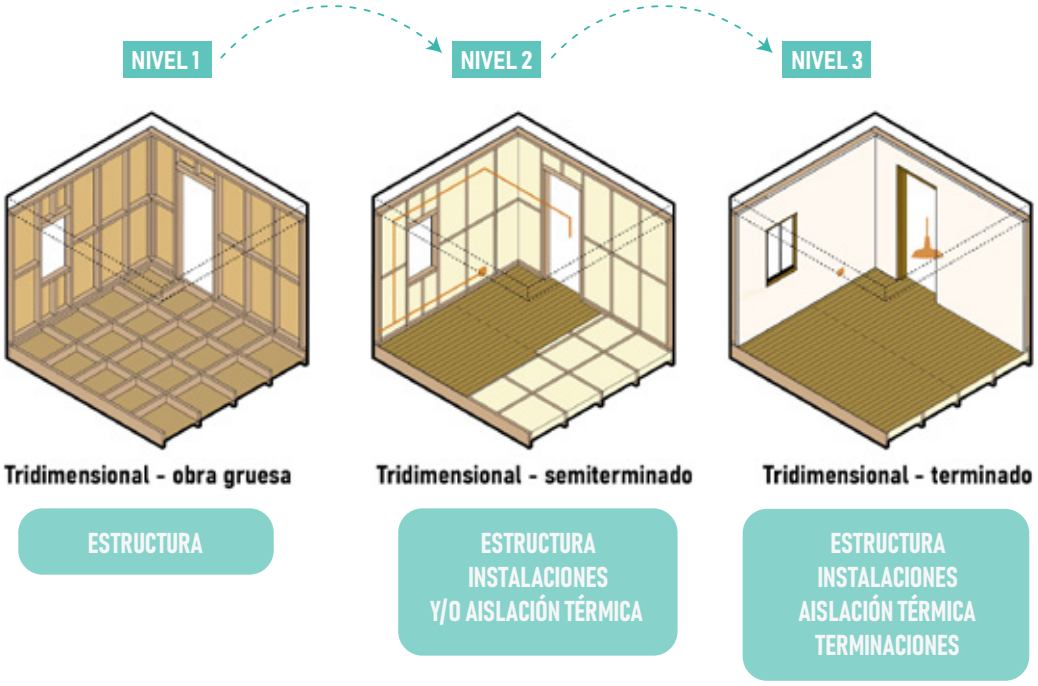


Figura 8. *Clasificación de módulos prefabricados*

1.5.1.3 POD's

Corresponden a unidades volumétricas terminadas en la planta prefabricadora, fabricadas en serie y que poseen un propósito definido. Su objetivo es centralizar su producción y agilizar el montaje y construcción en el sitio. No necesariamente posee capacidades estructurales, por lo tanto, en algunos casos su instalación se realiza sobre estructuras independientes, pero deben poseer una estructura que permita un adecuado transporte.

Los POD's pueden variar en tamaño y función, y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones en la construcción, como viviendas, edificios comerciales, hospitales, hoteles y otros recintos con características repetitivas. Algunas aplicaciones comunes de POD's son:

- **Baños:** Módulos de baño completos, que incluyen estructura, instalaciones sanitarias, artefactos, terminaciones y muebles. Su ejecución se realiza en la planta de prefabricación y su objetivo es agilizar el proceso constructivo en el sitio, al incorporar instalaciones sanitarias.

- **Habitaciones:** Recintos que consideran estructura, instalaciones eléctricas, terminaciones y muebles.

1.5.2 Madera masiva: CLT

Dentro de los sistemas constructivos en madera, se encuentran los sistemas en madera masiva, categoría de soluciones constructivas compuestas por capas de madera, es decir, elementos de madera sólida. El CLT (*cross laminated timber*) o madera contralaminada, que corresponde a un sistema constructivo en madera masiva, con listones de madera dispuestos en capas perpendiculares encoladas, conformando paneles de madera sólida, con gran rigidez en ambas direcciones. El número de capas es variable y en Chile se encuentran paneles de 3, 5, 7 y próximamente hasta 10 capas, mientras que las dimensiones son personalizables de acuerdo a las necesidades del proyecto. Los paneles pueden ser utilizados en muros, losas, entrepisos, techumbres e incluso escaleras.

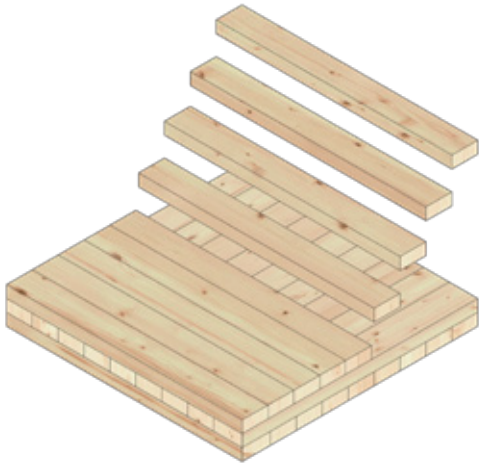


Figura 9. *Composición CLT*

Dentro de las ventajas del CLT destacan su alta capacidad de carga, rapidez de montaje, ventajas para su prefabricación, versatilidad en sus dimensiones, estabilidad dimensional, buen comportamiento térmico, acústico y contra el fuego y capacidad sismorresistente. Este último factor está dado por su gran resistencia y rigidez, lo que permite la ejecución de edificios de más de 15 pisos[21]. Actualmente, el CLT tiene un

21. Guindos, *Fundamentos del diseño y la construcción con madera*.

Figura 10. *Proceso de montaje con CLT*

amplio uso en edificios de mediana altura en países como Canadá, Estados Unidos, Nueva Zelanda y en la Comunidad Europea. Sin embargo, en Chile, aún corresponde a un sistema constructivo no tradicional, es decir, no cuenta con Norma de diseño estructural.

Actualmente en Chile existen dos empresas que fabrican CLT y debido a sus costos y características, su uso se orienta a la edificación en altura por su costo eficiencia para este tipo de edificios. Hasta el momento, es clasificado como un sistema constructivo no tradicional, por lo tanto, no es posible realizar viviendas sociales en este sistema.

Uno de los factores más relevantes del uso de CLT corresponde a los altos niveles de prefabricación y personalización de sus elementos, con elevados niveles de precisión en la producción, lo que se traduce en una importante reducción de residuos y en los tiempos de montaje en terreno.

El uso de la madera le otorga al CLT ventajas ambientales en comparación con otros sistemas constructivos, debido a su baja huella de carbono. Por otro lado, posee un buen desempeño térmico, característica especialmente relevante en el uso residencial, debido a que reduce el consumo energético durante el uso de la edificación.

Con miras en un desarrollo urbano sostenible, la edificación en mediana altura en CLT corresponde a una alternativa viable para el desarrollo habitacional en Chile, orientando la densificación hacia alternativas más eficientes con el uso de la energía durante el proceso constructivo y durante el uso del edificio.

2

Consideraciones generales en el diseño y prefabricación de elementos para proyectos industrializados

2.1

Entrega integrada de proyectos (IPD): Un cambio de paradigma

La Entrega Integrada de Proyectos (IPD por sus siglas en inglés: *Integrated Project Delivery*) marca un punto de inflexión en la forma en que abordamos los proyectos. En lugar de simplemente coordinar recursos y sistemas, la IPD fomenta una colaboración profunda y unificada, aprovechando las capacidades y perspectivas de todos los participantes para optimizar los resultados del proyecto, añadir valor al propietario, minimizar los desperdicios y aumentar la eficiencia en todas las etapas, desde el diseño hasta la fabricación y la construcción.

De acuerdo a las características y condiciones particulares de cada proyecto, el equipo de trabajo debe definir cuáles son sus objetivos en cada proyecto y en función de éstos, orientar su desarrollo y la toma de decisiones. El desarrollo de proyectos con financiamiento estatal puede considerar un enfoque diferente al de proyectos particulares y esto debe ser evaluado por cada equipo. La oficina de proyectos de Victoria, Australia[22] define seis factores críticos de éxito: integración y gestión del equipo del proyecto, toma de decisiones tempranas en el diseño, enfoque en el valor y no en el costo, planificación y programación, gestión de interfaz, necesidades de los *stakeholders* y requisitos de calidad y, por último, la logística y cuidado. En cada proyecto debe evaluarse la pertinencia de estos factores y definirse una estrategia de trabajo basada en objetivos.

La entrega integrada es una práctica que depende del método de entrega y la estructura contractual, donde ambos aspectos son definidos desde el inicio y requiere de todos los actores para innovar, sin embargo, cada experiencia es diferente y los contratos deben ajustarse para responder a los requerimientos y objetivos de cada proyecto en particular.

En este subcapítulo, se presentan en detalle los aspectos esenciales de la IPD y su impacto en la transformación de la manera en que concebimos y ejecutamos proyectos. La IPD no se limita a las relaciones tradicionales entre el propietario, el arquitecto y el constructor; puede adaptarse a una amplia gama de acuerdos contractuales y puede incluir una diversidad de

22. State of Victoria, «Offsite Construction Guide. Delivering Victorian projects with modern methods of construction».

profesionales. En todos los casos, los proyectos integrados se distinguen por una colaboración altamente efectiva entre el propietario, el diseñador principal y equipos de construcción, comenzando desde las primeras etapas del diseño y continuando hasta la entrega exitosa del proyecto.

A lo largo de este capítulo, se analizan los elementos fundamentales de la IPD y su aplicabilidad en proyectos de diseño y fabricación, permitiéndonos aprovechar al máximo las ventajas de la madera en la construcción y el diseño, a partir de conceptos asociados al flujo de trabajo en la construcción industrializada.

2.1.1 Participación temprana

A diferencia de proyectos de construcción tradicional, la construcción industrializada implica etapas de planificación y diseño más prolongadas y requieren la participación y coordinación de todas las partes involucradas desde el inicio del proyecto, considerando el equipo de diseño, especialistas, empresa industrializadora, equipos de transporte y montaje. La participación temprana facilita la identificación de oportunidades para la estandarización y prefabricación, lo que puede significar mayor rapidez del proceso constructivo, mayor eficiencia y la optimización de recursos.

Involucrar a la empresa industrializadora en el proceso de diseño permite incorporar principios de fabricación eficiente directamente en el diseño, lo que puede conducir a diseños simplificados y optimizados para la fabricación en entornos controlados. Por otro lado, se minimizan los errores de diseño y las incompatibilidades entre elementos, lo que se traduce en menores costos de correcciones durante la etapa de montaje. De la misma manera, considerar la visión de especialistas y equipos de transporte y montaje permiten anticipar soluciones en etapas críticas.

La optimización del proceso de diseño requiere el uso de interfaces adecuadas para la interacción entre todos los profesionales involucrados, que permitan conocer actualizaciones y cambios cuando sea pertinente. Las decisiones de diseño deben llevarse a cabo en etapas tempranas para permitir la prefabricación de elementos, aplicando el *Design Freeze* (ver 3.1.3.2) justo antes de esta etapa, con la aplicación de protocolos de gestión de cambios.

Por ejemplo, en el caso de una vivienda, aunque no sea necesario definir todos los detalles del diseño, como terminaciones interiores, revestimiento exterior o ubicación de artefactos, en las primeras etapas, puede ser útil fijar en el proyecto aquellos elementos que interfieren y retrasarían otros trabajos de diseño, como la ubicación de las fundaciones, la disposición de pernos de amarre, la posición de puertas y ventanas, y los puntos de conexión de tuberías.

En la construcción tradicional, el progreso es secuencial con fuertes dependencias de la realización de etapas previas, mientras que la construcción industrializada permite el desarrollo de etapas en forma paralela, como la ejecución de fundaciones junto con la prefabricación de elementos. Esta posibilidad implica una alta coordinación entre los dos equipos involucrados en cada tarea, para permitir la ejecución de actividades de acuerdo a los plazos comprometidos. Cuando se trabaja con elementos prefabricados, los coordinadores de proyecto deben entender las diferencias entre los cronogramas de fabricación y construcción y cómo pueden alinearse. En proyectos que consideren un alto porcentaje de elementos prefabricados, es probable que el cronograma del proyecto dependa de los plazos de la prefabricación.

En la construcción industrializada, el objetivo es producir en masa un producto estándar, con interrupciones mínimas en el flujo de diseño, ya que los cambios de diseño limitan la capaci-

dad de estandarización o producción en masa y, por lo tanto, limitan la obtención de beneficios de la prefabricación, la posibilidad de personalizar diseños depende de la evaluación de todas las partes y puede ser beneficioso si se realiza correctamente.

En proyectos con un porcentaje menor de elementos prefabricados, el cronograma del proyecto predominará por sobre el de prefabricación y el coordinador del proyecto debe ajustar la ventana de tiempo de entrega de los elementos con los tiempos de la obra en desarrollo.

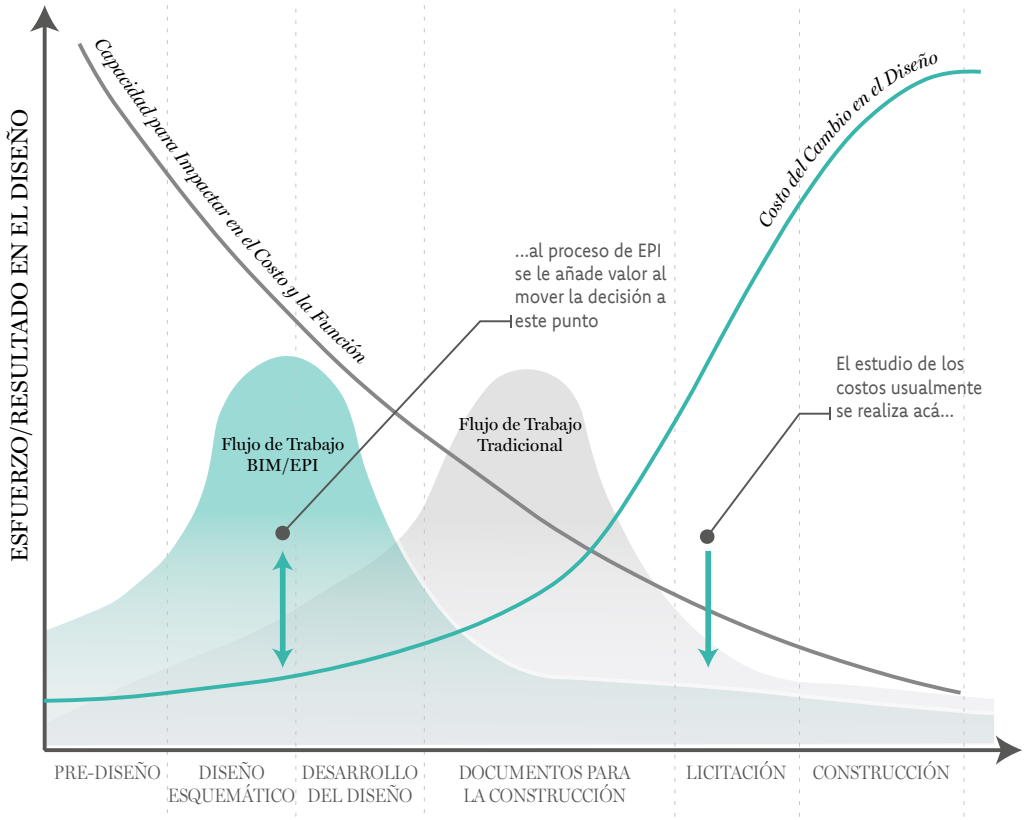


Figura 11. *Curva de MacLeamy.*
Ilustra la toma de decisiones de manera temprana en el proyecto, cuando la oportunidad de influir en resultados positivos se maximiza y el costo de los cambios se minimiza, especialmente en lo que respecta a los roles del diseñador y el consultor de diseño. Las decisiones sobre la prefabricación deben tomarse de manera colaborativa al principio de un proyecto para controlar el costo y obtener sus beneficios.

La industrialización implica un alto grado de definición del proyecto en la etapa de diseño, buscando anticipar problemas que usualmente aparecen durante las etapas de montaje y construcción en el sitio. Este requerimiento implica por otro lado, mayores dificultades para cambios en etapas posteriores y costos más elevados, en comparación con la construcción tradicional. Esto debido a que la cadena de producción depende de un flujo de información que debe ser corregido para todos los encargados de la prefabricación.

La incorporación tardía de elementos prefabricados debe ser evitada, debido a que podría ser incluso perjudicial para la obra, al agregar nuevas variables sin previa coordinación.

La Figura 3 presenta las diferencias sobre la instancias en que diferentes decisiones son abordadas, comparando un proceso tradicional y uno integrado.

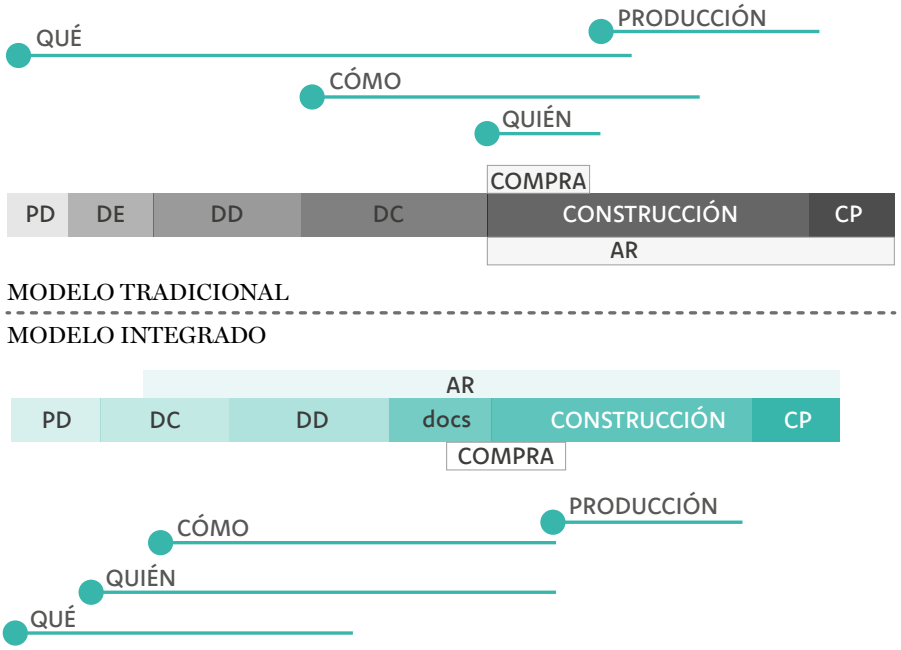


Figura 12. *Comparación de una entrega tradicional de una integrada*
El diagrama muestra la etapa en la cual se resuelven diferentes aspectos (qué, quién, cómo, producción) y cuándo se involucran los diferentes participantes en el proyecto.
La IPD propone la identificación temprana de los objetivos del proyecto, con el fin de tomar decisiones sobre la producción al inicio del proyecto. Debido a la toma de decisiones temprana, la empresa industrializadora puede generar documentación que servirá posteriormente para la etapa de construcción. Debido a que el proyecto está coordinado en gran medida antes de que comience la fase de construcción, la prefabricación y el montaje son más eficientes y pueden significar menores tiempos de construcción.
PD: Prediseño, DE: Diseño esquemático, DC: Diseño conceptual, DD: Desarrollo de diseño, CP: Cierre de proyecto.

2.1.2 Participación del mandante

El IPD hace especial hincapié en la participación del propietario o cliente a lo largo de todo el proyecto. Su aporte y punto de vista se considera esencial en el proceso de la toma de decisiones.

En gran medida el éxito de un proyecto y la optimización se logra con una correcta coordinación, que puede involucrar a:

- Usuario final
- Equipo de diseño
- Equipo de cálculo estructural
- Especialista eléctrico
- Especialista sanitario
- Empresa industrializadora
- Equipo de transporte de elementos al sitio de emplazamiento final
- Equipo de montaje
- Profesional coordinador BIM
- Especialista en normativa

En proyectos de mayor complejidad también pueden estar involucradas otras especialidades, que pueden o no estar contenidas en los elementos prefabricados.

La definición de roles en el proceso tiene un valor importante, debido a que la ausencia de coordinación podría generar interferencias en el diseño. La IPD se considera una respuesta a algunas de las limitaciones de los métodos tradicionales de desarrollo de proyectos, como el *Design-Bid-Build* o el *Design-Build*, en los que la comunicación y la colaboración entre las partes interesadas suelen ser limitadas y muy segregadas. Al fomentar una cultura de cooperación y responsabilidad compartida, el IPD pretende entregar los proyectos de forma más eficiente, con menos retrasos y sobrecostos

2.1.3 Comunicación continua

La colaboración es fundamental para aprovechar los beneficios de la construcción industrializada. Requiere estrategias y mecanismos efectivos para generar confianza entre las partes interesadas. Dentro de los factores clave para el éxito de la colaboración, se encuentran[23]:

- Proporcionar liderazgo para promover y fomentar activamente la colaboración, por ejemplo, programando reuniones regulares.

- Utilizar soluciones digitales para asegurar la alineación, incluyendo una fuente única de información y un entorno de datos comunes.

- Enfoque colaborativo de entrega contractual, como la integración del equipo del proyecto, alianzas y asociaciones, la participación temprana del contratista y la entrega integrada.

- La disposición de las partes interesadas para invertir en la construcción de relaciones a mediano y largo plazo, y un alto nivel de compromiso para realizar cambios de comportamiento en toda la cadena de suministro.

23. State of Victoria.

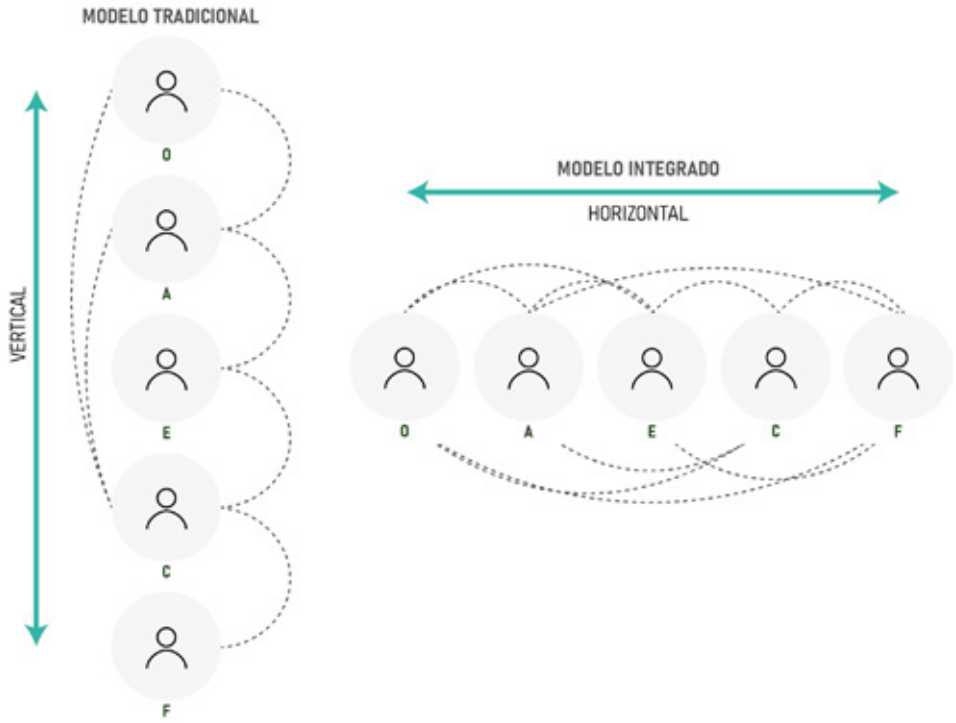


Figura 13. *Coordinación en una entrega tradicional y una integrada*

2.1.4 Toma de decisiones colaborativa

Al momento de enfrentar un proyecto, el equipo de diseño debe determinar tempranamente aspectos relevantes dentro de este, en función de sus objetivos y requerimientos, la normativa y los recursos disponibles y será necesario contar con la visión que entrega cada especialista del proyecto.

Fomentar la toma de decisiones colaborativa permite a los equipos comunicarse más libremente con información disponible, con la que antes no habría sido posible contar[24]. Actualmente, la disponibilidad de software entrega la oportunidad de compartir información entre diferentes áreas del proyecto, además de la aplicación de nuevos tipos de contratos, diferentes a los utilizados en proyectos de construcción tradicional.

La construcción industrializada depende en gran medida de la colaboración y la coordinación: el equipo de diseño, el constructor y el fabricante tienen múltiples instancias de cooperación. En este tipo de proyectos, el coordinador del proyecto requiere comprender los tres roles y tener la capacidad de optimizar decisiones que afectarán a los tres. A continuación, se presentan algunos aspectos relevantes que deben considerarse tempranamente y decidirse de manera colaborativa:

24. Smith, *Prefab Architecture.*

- **Sistema constructivo: Entramado ligero, CLT u otro.**
  Ambos sistemas poseen características favorables, sin embargo, existen aspectos notablemente diferentes que deben ser considerados. Actualmente en Chile, la disponibilidad de CLT es menor a la de entramado ligero, sus costos son mayores y pueden variar dependiendo del emplazamiento del proyecto. Por otro lado, cada sistema presenta diferentes complejidades que dependen de la especialización del equipo de montaje.

- **Tipo de elemento prefabricado: Paneles o módulos.**
  Puesto que cada elemento posee alcances diferentes, su evaluación debe considerar a la empresa responsable de la prefabricación de los elementos, desde la fabricación de paneles en obra gruesa hasta la fabricación de módulos con terminaciones, artefactos y mobiliario. Por otro lado, la ubicación de la empresa respecto al sitio también es un factor a considerar.

  El peso de los elementos puede ser relevante en función de las características del terreno y del camino donde se transportarán. Sectores rurales presentan limitaciones en este sentido, debido a que los caminos podrían dificultar el traslado de grandes pesos. En sectores urbanos podrían existir limitaciones vinculadas con la disponibilidad de espacio para el traslado y manipulación de los elementos en el sitio de emplazamiento.

  Las distancias de traslado pueden tener implicancias en el tipo de solución a utilizar, debido a que el traslado de módulos implica el traslado de aire y sus costos pueden ser muy elevados para grandes distancias.

- **Empresa industrializadora:** Para el proceso de diseño de un proyecto industrializado es indispensable conocer las capacidades de la empresa encargada de la prefabricación de elementos, para determinar los alcances que tendrá la prefabricación en relación al total de la obra.

- **Nivel de prefabricación de los elementos:** Posterior a la selección del tipo de elemento prefabricado a utilizar, debe determinarse el grado de prefabricación de estos elementos, de manera de alcanzar de mejor manera los objetivos del proyecto.

- **Normativa aplicable al proyecto:** Ya sea para proyectos con financiamiento estatal como para proyectos particulares, existen reglamentaciones que definen aspectos que guardan directa relación con las soluciones constructivas, como los requerimientos de resistencia al fuego, requerimientos térmicos o acústicos. En el caso de viviendas industrializadas con financiamiento estatal debe cumplirse el estándar higrotérmico definido para este tipo de edificaciones.

- **Especialidades involucradas:** La complejidad de un proyecto implica desafíos de coordinación, que deben ser anticipados por el equipo de diseño. La consideración de las especialidades a incorporar en un proyecto implica la generación de un plan de trabajo coordinado entre el equipo de diseño y los especialistas. El uso de metodología BIM facilita el desarrollo de proyectos y una correcta coordinación, por lo tanto, es preferente la colaboración de especialistas involucrados en proyectos industrializados que conozcan las limitaciones y alcances de los sistemas prefabricados.

  Por otro lado, se debe decidir la etapa en que se instalarán los ductos de especialida-

des al proyecto, ya sea en los paneles o módulos en fábrica o en el sitio de emplazamiento, posterior al montaje de los elementos. Esta variable está definida previamente por cada empresa industrializadora y su línea de producción está montada de acuerdo a esta consideración.

Entre los proyectos de especialidades que puede requerir un proyecto, se encuentran principalmente:

- Proyecto de cálculo estructural
- Proyecto eléctrico
- Proyecto sanitario
- Proyecto de alcantarillado
- Proyecto de gas
- Proyecto de eficiencia energética (colectores solares, paneles fotovoltaicos, etc.)

En proyectos de mayor complejidad se pueden requerir:

- Proyecto de clima (HVAC)
- Proyecto de seguridad y protección contra el fuego
- Proyecto de paisajismo

Las capacidades y alcances de cada empresa industrializadora son diferentes y no siempre se considera la ejecución de perforaciones para ductos de especialidades y su instalación. Por este motivo, se debe determinar tempranamente el nivel de prefabricación deseado para el proyecto y la empresa prefabricadora encargada.

- **Cálculo estructural:** Conforme a los requerimientos del proyecto, puede ser ventajoso un sistema constructivo o un grado de prefabricación frente a otro.

- **Detalles desarrollados por la empresa industrializadora:** Detalles constructivos asociados a la metodología de trabajo de cada empresa.

De acuerdo a los alcances de cada empresa, su metodología podría considerar el transporte y montaje de elementos, lo que considera la elaboración de detalles constructivos para obras en el sitio.

Puede considerar: detalles de conexiones entre paneles, conexiones entre paneles y fundaciones, detalles constructivos para la etapa constructiva en el sitio de emplazamiento, tolerancias y otros vinculados con el método constructivo.

La disponibilidad de esta información permitirá adelantar el punto de partida del proyecto.

- **Costos:** Cada proyecto posee requerimientos específicos y en el caso de proyectos con financiamiento estatal, el costo es una variable importante a tener en cuenta al momento de diseñar.

El tipo de elemento (panel o módulo), su grado de prefabricación, su transporte y montaje son aspectos que pueden influir considerablemente en los costos de un proyecto y cada una tiene impacto en las demás, por lo tanto, debe existir un balance y evaluación constante de todas las variables en conjunto y las capacidades de los equipos involucrados.

En paralelo con la evaluación de costos, cada empresa evalúa la cadena de proveedores asociados al proyecto y las relaciones contractuales con cada uno, que pueden variar en comparación con la construcción tradicional. La certidumbre respecto a costos de cada material y los tiempos de entrega a clientes se ven involucrados con este aspecto.

- **Distancia entre la planta de prefabricación y la obra:** Implicancias respecto al proceso de transporte y la logística involucrada. La

evaluación de la distancia tiene directa relación con el tipo de elemento prefabricado, debido a que el traslado de módulos implica el traslado de aire y puede significar grandes diferencias en el presupuesto del proyecto, respecto a su ejecución en paneles.

- **Tiempos:** Cada solución disponible en el mercado posee tiempos de ejecución diferentes, en función del grado de prefabricación, ubicación de la empresa respecto al sitio, disponibilidad de materiales, entre otras variables. Junto con esto, la experiencia del equipo de montaje puede ser relevante al momento de ejecutar un proyecto.

- **Desmontaje y reutilización de elementos:** Con el fin de prolongar el ciclo de vida de una edificación, la idea de reutilización de elementos debe estar presente desde etapas tempranas, con el fin de incorporar estas consideraciones dentro del diseño para facilitar el futuro desmontaje e incluso el segundo montaje.

- **Lecciones aprendidas:** Debido a la naturaleza de la construcción industrializada, la evaluación de experiencias previas es crucial para la optimización y mejora de procesos y soluciones. Los errores de proyectos previos pueden entregar información relevante respecto a cómo mejorar soluciones para optimizar el proceso constructivo en cuanto a tiempo, costos, generación de residuos, entre otros. De la misma manera, cada aspecto de proyectos anteriores debería ser evaluado al comienzo del proceso, con el fin de obtener mayores ventajas de la prefabricación.

  Tanto arquitectos, como especialistas, empresas industrializadoras y otros colaboradores de proyectos industrializados que posean experiencias previas pueden realizar una evaluación de sus procesos y errores que presenten posibilidades de mejora para futuros proyectos.

  En este contexto, las relaciones a largo plazo poseen la ventaja de considerar procesos de mejora continua que beneficien a todas las partes, a través de la reutilización de experiencias y mediciones realizadas anteriormente.

2.1.5 Resolución temprana de problemas

La cantidad de profesionales involucrados en un proyecto industrializado puede ser amplia y la coordinación de todas las partes requiere de metodologías de trabajo que aseguren la respuesta rápida y eficiente ante inconvenientes que puedan aparecer en el proceso. La identificación y resolución temprana de problemas fomenta una comunicación efectiva entre todas las partes involucradas en el proyecto, incluidos arquitectos, ingenieros, constructores y la empresa prefabricadora.

Identificar y abordar problemas de manera temprana evita retrasos significativos en el proyecto y la corrección de problemas en las etapas posteriores de la construcción puede ser mucho más costosa en términos de tiempo y recursos. Además, permite ajustar el diseño y los planos antes de que se inicie la prefabricación de elementos. Esto puede resultar en un diseño más eficiente y una mejor resolución de aspectos constructivos para el montaje.

Mantener la fluidez del proceso constructivo ayuda a cumplir con los plazos establecidos tanto con la empresa constructora como con el cliente y corresponde a una buena práctica dentro de cualquier proyecto constructivo.

2.1.5.1 Metodología BIM

BIM es un conjunto de tecnologías, procesos y políticas que permiten a múltiples partes interesadas diseñar, construir y operar colaborativamente una edificación en un espacio virtual[25].

El uso de esta metodología facilita el intercambio estructurado de información entre todas las partes involucradas, promoviendo la colaboración y el trabajo interdisciplinario, lo que añade valor a los procesos de la industria y especialmente a proyectos de construcción industrializada. Por otro lado, entrega bases confiables para la toma de decisiones a lo largo de todo el ciclo de vida de un proyecto.

Para proyectos industrializados, el nivel de detalle de un modelo estará relacionado con el grado de inclusión de elementos prefabricados y debe considerar documentación específica del proceso de prefabricación, transporte y montaje de un sistema. Dentro de esta información, se incluyen especificaciones para la prefabricación de elementos, lista de materiales, planos de fabricación y documentación asociada, manuales de montaje, entre otros.

El LOD o Nivel de información deseado para un proyecto, tendrá relación con la complejidad del proyecto y sus alcances

Como define el Manual BIM de Nueva Zelanda[26], existe terminología común en el entorno BIM:

- Coordinación de diseño
- Comunicación
- Manejo de información
- Análisis y simulación
- Mejora en la productividad durante la construcción
- Mejor información para la gestión de activos

El entorno BIM puede considerar la colaboración entre diferentes actores, que generarán modelos de sus proyectos, entre los que se pueden encontrar:

Modelo BIM	Edificación
Sitio	
Volumétrico	
Arquitectura o diseño de infraestructura	
Estructura	
Mecánico eléctrico sanitario	
Coordinación	
Construcción	
As-Built	
Operación	

Figura 14. *Tipos de modelos BIM que componen un proyecto*

La construcción industrializada debe considerar el detalle de elementos prefabricados, que pueden considerar más de uno de estos mode-

25. «BIM Dictionary».
26. *The New Zealand BIM Handbook.*

los, dependiendo del grado de industrialización del panel o módulo. En el caso de un panel, el modelo podría contener elementos de arquitectura, estructura, eléctrico y/o sanitario.

Para la coordinación del trabajo entre los diferentes actores involucrados en el desarrollo de un proyecto, existen diversas maneras de reunir la información generada por cada uno. La estrategia a utilizar debe ser conocida por todos los actores y empleada durante todo el desarrollo del proyecto. Entre las estrategias existentes, se presentan dos que permiten la consolidación de modelos e información:

- **Modelo Integrado:** Considera la generación de un modelo a partir de diferentes disciplinas del proyecto, en una base de datos única.

- **Modelo Federado:** Se contempla la creación de un modelo mediante la vinculación a archivos independientes de las diversas disciplinas del proyecto. Esto facilita la lectura de información y el procesamiento de datos de otros modelos, aunque cabe destacar que cualquier modificación debe llevarse a cabo en cada archivo original vinculado. Para proyectos de gran escala, la división de modelos permite el uso de archivos con dimensiones manejables.

Para lograr la colaboración efectiva, es fundamental que todos los participantes del proyecto generen información utilizando procesos y métodos de comunicación estandarizados que aseguren la calidad de los datos.

Para asegurar la interoperabilidad entre los diferentes actores de un proyecto, el entorno BIM emplea el uso del estándar IFC (Industry Foundation Classes, del estándar internacional ISO 16739-1:2018), que permite compartir información en un entorno común, a partir de archivos provenientes del mismo o diferentes software. En este caso, se requiere la misma versión de IFC para facilitar la interoperabilidad.

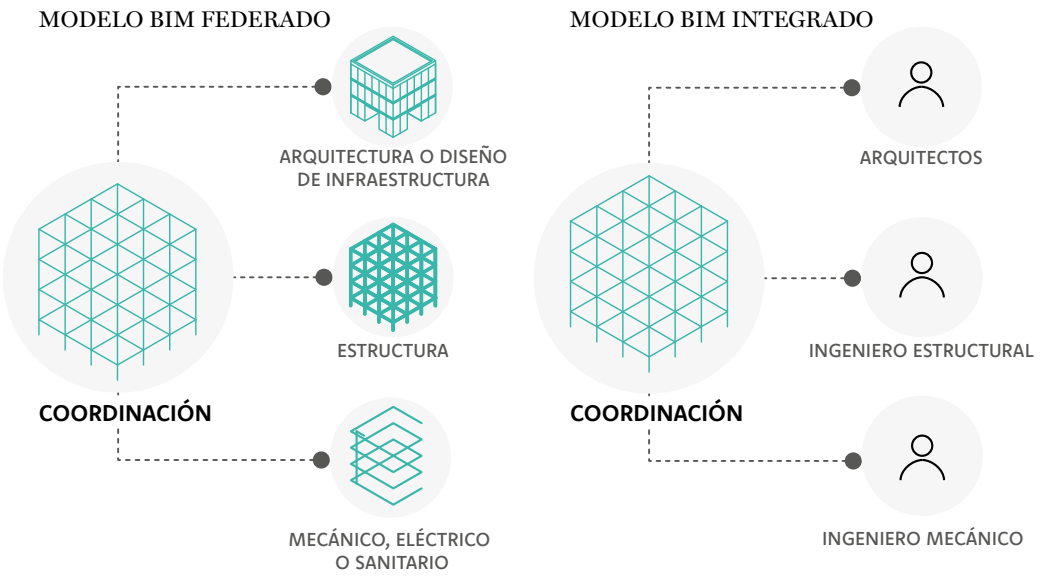


Figura 15. *Estrategias de consolidación de información en modelos BIM*

Del mismo modo, los software vinculados con la fabricación pueden intercambiar modelos utilizando archivos STEP. Los problemas de interoperabilidad surgen cuando es necesario que software de diferentes ámbitos intercambien información. El intercambio de información entre IFC y STEP puede ocasionar pérdida de datos, ya que IFC está diseñado para capturar distintas características de los elementos de construcción, mientras que STEP se centra más en la fabricación de producto.

El uso de estas metodologías permite la coordinación entre equipos de trabajo, facilitar el traspaso de información, obtener datos precisos del proyecto y detectar interferencias entre modelos.

2.1.5.2 Principios de la Metodología *Lean*

Una de las principales búsquedas de la construcción industrializada es el aumento en la eficiencia de sus procesos, asociada a la mejora continua. En este contexto, se vincula directamente con la metodología Lean, proveniente de Toyota, en la industria automotriz, cuyos objetivos son principalmente mejorar la eficiencia, eliminar desperdicios y maximizar el valor de productos.

La aplicación de Lean Manufacturing en la construcción industrializada se traduce en una búsqueda constante de la eficiencia y la eliminación del desperdicio. Esto implica la identificación temprana del valor desde la perspectiva del cliente y un diseño centrado en satisfacer esas necesidades sin agregar complejidad innecesaria. Los procesos de fabricación de elementos prefabricados se optimizan para minimizar el tiempo de espera, la sobreproducción y el exceso de inventario. La gestión de inventarios se rige por un enfoque "*pull*", lo que significa que los elementos se producen y se entregan solo cuando son necesarios. Además, se establece un flujo de trabajo continuo y se empodera a los trabajadores para que participen activamente en la mejora constante de procesos, lo que garantiza una producción eficiente, segura y de alta calidad.

En este contexto, Lean también se enfoca en la seguridad y la calidad a lo largo de todo el proceso, lo que es fundamental en la construcción.

2.2
Aplicación del enfoque DfMA (*Design for Manufacture and Assembly*) para la optimización del proceso

Figura 16. *Tecno Panel, planta industrializadora*

La construcción industrializada presenta nuevos desafíos y considera la adopción de nuevos enfoques y metodologías que posibiliten el éxito de un proyecto, con las consideraciones asociadas a nuevas formas de construir.

Design for Manufacture and assembly (DfMA) corresponde a un enfoque vinculado a la construcción industrializadaa, que busca optimizar el diseño para aumentar la eficiencia de la producción en masa, junto con obtener ventajas a través de un enfoque colaborativo, que considere a toda la cadena de valor. Por otro lado, busca facilitar la construcción off-site y minimizar la construcción en terreno, para la optimización del proceso.

DfMA también incluye conceptos como el "kit de partes", un enfoque de diseño que estandariza y reduce los requisitos de fabricación y materiales. Un kit de partes implica cierta estandarización y construcción fuera del sitio. Su objetivo es generar propuestas evaluadas previamente por ingeniería y diseñadas a partir de diversos elementos que se pueden montar de múltiples formas para crear una construcción completa.

El concepto considera dos aspectos: el diseño para la manufactura y diseño para el montaje.

El diseño para la manufactura tiene relación con las consideraciones asociadas a la fabricación de elementos constructivos en las plantas de prefabricación, la maquinaria y tecnología disponible. Dentro de las consideraciones se encuentran: tipos de material, espesores, dimensiones, formas, tolerancias y una visión global de la composición del proyecto. La inclusión de estos factores en el proceso de diseño permitiría reducir la generación de residuos, mejorar la calidad de la producción y reducir costos.

El diseño para el montaje se vincula con las consideraciones asociadas al proceso de montaje, desde la carga de elementos en el camión, su desmontaje en obra e instalación en el sitio. El objetivo principal es la minimización de trabajos en el sitio de emplazamiento del proyecto. Dentro de las consideraciones se encuentran:

- **Dimensiones permitidas por el o los medios de transporte:** para el tránsito por carreteras se establecen dimensiones máximas de carga en alto, ancho y largo.

- **Estrategia de transporte de los elementos en el camión:** En el caso de transporte de paneles, pueden ser trasladados de forma horizontal o vertical y cada alternativa presenta diferentes alcances y restricciones.

- **Maquinaria disponible para el montaje:** Pesos máximos de los elementos, brazo de la grúa y espacio disponible para su maniobra.

- **Tipo de conexiones a utilizar**

DfMA considera factores como la ubicación, la cadena de suministro, la logística y la producción en la fase de diseño, lo que influye en la definición del diseño con una mayor previsibilidad de la construcción.

Contemplar todo el proceso constructivo y en particular las etapas mencionadas favorecerían el desarrollo de procesos más eficientes y generaría ventajas para el proyecto, derivadas de la inclusión de la prefabricación.

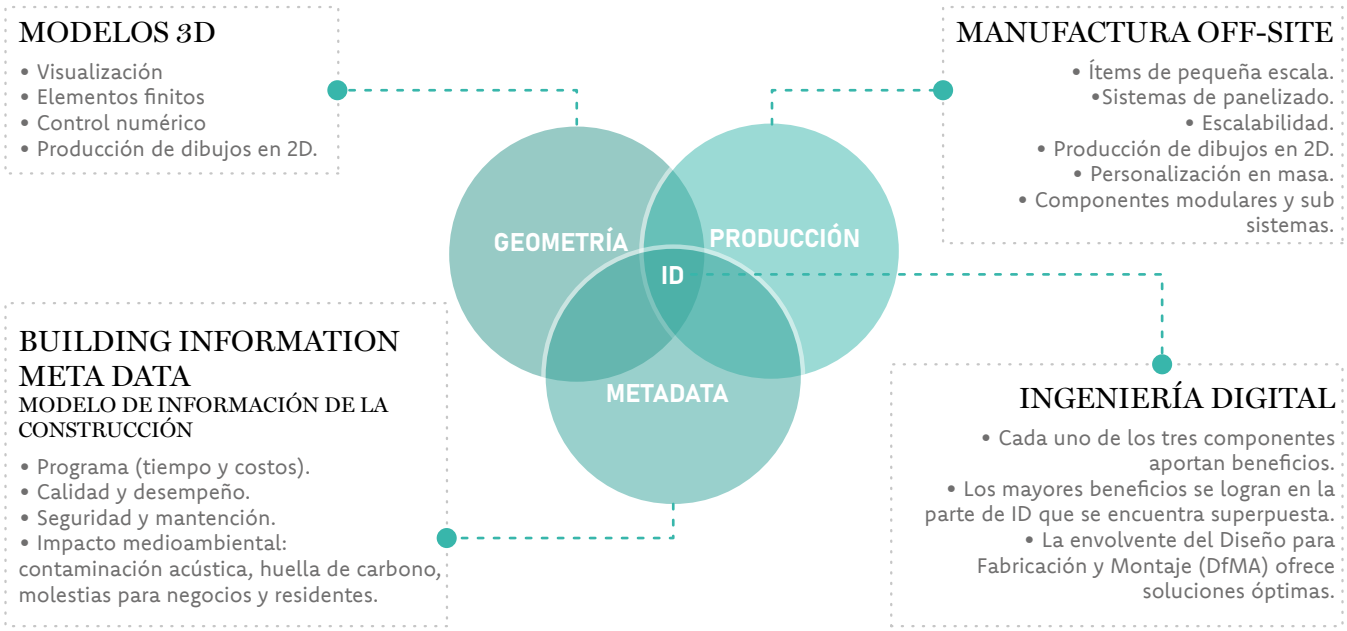


Figura 17. *Contexto de aplicación DfMA*

Diversas experiencias[27] destacan la adopción del enfoque DfMA junto con BIM, considerando el entorno colaborativo de integración que entrega BIM, su uso en conjunto permitiría facilitar y fortalecer la colaboración entre actores del proceso a lo largo de todas las etapas del proceso.

Dentro de las potenciales ventajas en la incorporación del enfoque DfMA en conjunto con BIM, para optimizar el proceso, se destacan[28]:

- **Mejoras en la productividad:** Integrar la prefabricación en ambientes controlados con los modelos BIM puede reducir las labores requeridas y mejorar la productividad.
- **Mejora en la calidad del producto fabricado:** El uso de tecnologías de modelación permite anticipar y simular su construcción, lo que permite la resolución de inconvenientes constructivos y mejorar la calidad del producto.
- **Reducción de residuos generados en el proceso constructivo:** Contemplar aspectos de manufactura desde etapas tempranas conlleva la optimización de materiales.
- **Reducción de costos:** El aumento de eficiencia en el proceso constructivo conlleva reducciones en los costos del proyecto.
- **Mayor certidumbre en plazos involucrados:** La reducción de tiempos de trabajo en el sitio de emplazamiento implica una reducción de incertidumbre y toma de decisiones que dependan de situaciones particulares, por lo tanto, la seguridad en plazos es mayor.
- **Mejoras en la seguridad en las obras:** Diseñar elementos DfMA teniendo en mente la seguridad en el sitio y el testeo de maniobras en modelos BIM como el izaje de elementos, mantención y fabricación en ambientes controlados en fábrica puede ayudar a reducir la cantidad de incidentes.
- **Reducción de la mano de obra:** Planificar y calendarizar en BIM permite un empleo más eficiente de los recursos.
- **Mejorar el desempeño ambiental:** Desarrollar elementos estandarizados en BIM y prefabricar en ambientes controlados de fábricas puede ayudar a hacer seguimiento a la huella de carbono.

2.2.1 Estandarización

El cambio de método constructivo considera nuevas formas de formular la construcción de un proyecto. En este sentido, es necesario tener presente la prefabricación de elementos y las consideraciones asociadas al uso de maquinaria y la construcción de elementos en una planta prefabricadora

El uso de maquinaria para la construcción beneficia el proceso constructivo, reduciendo tiempos de manufactura e incrementando la calidad de los resultados y en para esto, existen estrategias que permiten potenciar la optimización de materiales, el uso de maquinaria, tiempo y costos. Por otro lado, la eficiencia de procesos constructivos que consideran industrialización se ve incrementada con la producción de manera repetitiva de elementos o elementos.

Junto con la simplicidad, la prefabricación y la calidad, la estandarización es un principio que, aplicado en el diseño, se vincula directamente con la productividad. El caso de Singapur se presenta como una forma de medir la productividad de un diseño de acuerdo a su facilidad de

27. Staub-French et al., «Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction».
28. Building and Construction Authority y Bryden Wood Singapore, «BIM for DfMA (Design for Manufacturing and Assembly) Essential Guide».

construcción, a través de un índice[29] que incentiva la repetición de dimensiones de elementos o premia la inclusión de construcciones volumétricas prefabricadas, entre otras medidas.

Un producto estándar utilizado repetidamente a lo largo de proyectos permitirá que la cadena de suministro desarrolle un kit de partes con un rendimiento y plazos de entrega conocidos.

Junto con la estandarización en el diseño, los procesos también deben poseer procedimientos estandarizados, que favorezcan la rapidez en la producción en serie y la fluidez de los procesos.

El uso de soluciones estandarizadas favorece el flujo dentro de la línea de producción y entrega mayor claridad respecto a los procesos para quienes los desarrollan. Por otro lado, aumenta la certidumbre dentro del proceso, debido a que las decisiones se toman de manera centralizada y se reducen los márgenes de toma de decisiones.

La primera estrategia de diseño hace referencia a la optimización del uso de maquinaria, con la estandarización de sistemas constructivos. En la medida en que exista un mayor número de elementos con características en común, se reduce la posibilidad de errores en su fabricación y una mayor rapidez en el proceso.

Es importante destacar la importancia de la mejora continua a través de la retroalimentación con clientes y usuarios, que permite un desarrollo de mejores soluciones.

Existen diversas formas de estandarizar el diseño, entre las que se encuentran algunos criterios en común:

- Dimensiones de los elementos (paneles o módulos)
- Solución constructiva: escuadrías, distanciamientos, tipos de materiales, estructuración de diferentes tipos de muros (con ventana, puerta u otro tipo de composición).
- Soluciones para proyectos de especialidades: ubicación de los ductos, tipos de conexiones entre ductos,
- Tipos de conexión entre paneles o módulos: Entre muros (unión lateral, perpendicular o en esquinas), entre muro y entrepiso, entre muro y techumbre, entre paneles de entrepiso y entre paneles de techumbre.
- Ubicación de artefactos.

Respecto a la generación de información, la estandarización en el flujo de información, software y plataformas de trabajo debe establecerse en el inicio del proyecto, con el fin de optimizar el uso de tiempo y recursos y minimizar la repetición de trabajo.

En términos generales, se lleva a cabo la estandarización de procesos, establecidos a través de normativas generadas por cada país.

2.2.2 Personalización

El uso de sistemas industrializados y la producción en masa no debe ser en desmedro del diseño arquitectónico, por lo tanto, el proceso debe considerar estrategias de personalización.

La incorporación de alternativas de personalización de los productos permite tener un mayor control de las variables y certidumbre en tiempos, costos y recursos que implican las modificaciones. En comparación con modificaciones realizadas posterior al proceso de diseño, su consideración de forma temprana

29. Building and Construction Authority, Singapore, «The Code of Practice on Buildability».

permite incorporar las variables dentro de la línea de producción existente, optimizar el proceso y conocer los alcances e implicancias de cada propuesta.

Algunos proyectos pueden entregar la posibilidad de elegir terminaciones, distribución de recintos con un esquema acotado de posibilidades que consideran una evaluación previa de las implicancias económicas y en el proceso de fabricación. En estos casos, el equipo de diseño debe tener en cuenta el proceso de fabricación y las modificaciones que requeriría un cambio en la línea de producción.

La personalización en masa es el proceso que permite a los fabricantes personalizar sus productos al variar sus procesos de producción sin afectar sus costos. Habilitado por la tecnología digital, es posible gracias a la automatización y técnicas innovadoras de fabricación que ayudan a los fabricantes a producir elementos intercambiables, tal vez en diferentes tamaños y acabados, que se pueden combinar de diversas maneras para satisfacer las necesidades específicas de los clientes. También es posible mediante la reducción del tiempo y el costo de cambiar las configuraciones del proceso de fabricación para diferentes variantes de un producto o elemento.

Debido a que se fabrican diferentes elementos en una sola línea de producción o por la misma cadena de suministro en lugar de varias líneas o cadenas diferentes, y se producen con parámetros estandarizados, el proceso sigue siendo tan eficiente, o casi tan eficiente, como el enfoque de producción en masa.

Las variables de personalización son variadas y pueden considerar: tipo de revestimientos, número de recintos, tipo de ventanas o puertas, alternativas para artefactos, entre otras. Dependiendo del tipo de maquinaria y la línea de producción de cada empresa, la generación de propuestas debe acompañarse de un análisis ceñido a las posibilidades, costos y condiciones de cada una.

2.2.3 Escalabilidad

La escalabilidad en la construcción industrializada es un factor crucial para generar sistemas de producción eficientes y aprovechar los beneficios de tiempo y costos que es posible alcanzar con la industrialización.

La aplicación de este concepto permite a las empresas fabricar elementos de construcción en grandes cantidades. Esto conduce a economías de escala, lo que significa que a medida que se produce más, el costo unitario de producción disminuye. La producción a gran escala es esencial para reducir los costos y aumentar la eficiencia en la construcción industrializada.

Por otro lado, la producción en masa de elementos prefabricados y módulos permite una mayor eficiencia en la utilización de materiales, mano de obra y recursos. Además, al estandarizar los procesos y elementos, se reduce la variabilidad y se disminuyen los errores de construcción. Esto, a su vez, reduce los costos totales de construcción y aumenta la rentabilidad.

2.2.4 Optimización

La optimización es un concepto clave en la construcción industrializada y su aplicación se vincula con mejoras en la eficiencia de producción, mejoras en la calidad y flexibilidad de productos, reducción de costos, reducción de plazos y reducción en la generación de residuos.

Para obtener reducciones en los tiempos de construcción, la implementación de estrategias de optimización debe realizarse durante la etapa de diseño, considerando las características de la planta donde se fabricarán las soluciones a ejecutar, la estrategia de montaje y las condiciones del sitio de emplazamiento. A partir de los aspectos mencionados, existe la posibilidad de optimizar en términos de tiempo, materiales, en el uso de maquinaria, costos y recursos humanos.

Junto con un diseño optimizado, la línea de producción debe tener una distribución de estaciones eficiente, que favorezca la rapidez en la fabricación. Por otro lado, la producción en masa requiere el uso de maquinaria orientada a potenciar la industrialización del proceso.

3

Etapas de la construcción industrializada

Las fases de un proceso constructivo industrializado contienen diferencias en relación a un proceso constructivo tradicional, en especial en cuanto a los flujos de trabajo y actores involucrados. La RIBA define siete fases de trabajo en los proyectos de construcción, que se tomarán como referencia para la presentación de flujos de trabajo de un proyecto industrializado, incorporando el enfoque DfMA en cada etapa.

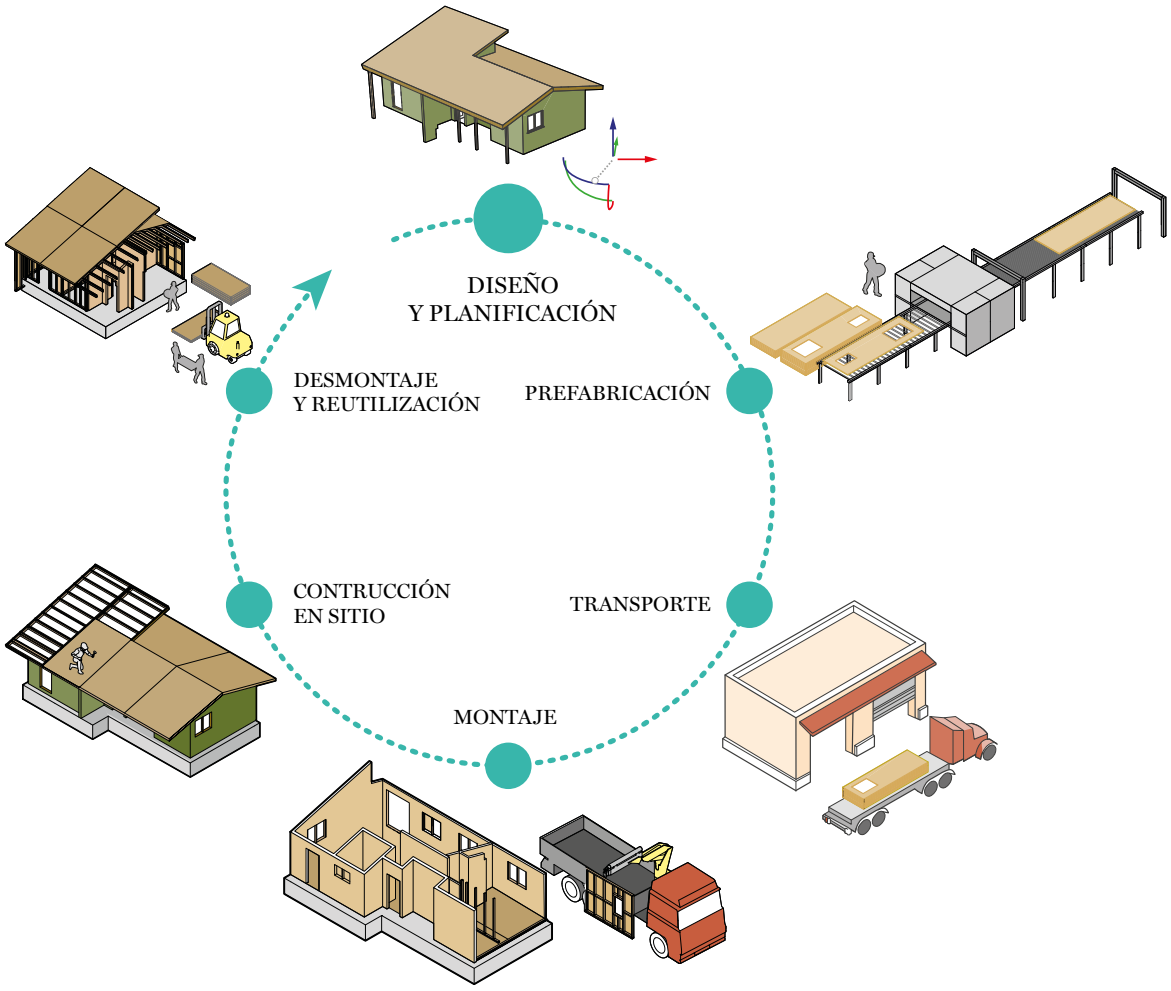


Figura 19. *Etapas de un proceso constructivo industrializado*

3.1 Diseño y Planificación

3.1.1 Definición estratégica

La evaluación de factibilidad de un proyecto tiene comienzo con la evaluación de lecciones aprendidas en proyectos previos, con el objetivo de generar mejoras en aspectos críticos de procesos pasados y optimizar las soluciones, ya sea en términos constructivos, económicos, logísticos o de tiempo.

Las decisiones de diseño deben estar alineadas con los objetivos del proyecto, ya sea en cuanto a la duración de las etapas y el efecto que podría tener la extensión del proceso constructivo, los costos asociados a tareas de mantención o las ventajas que podría tener un alto detallamiento de un proyecto, implicando un aumento en el tiempo dedicado a la etapa de diseño.

La fijación de una fecha límite para el término de un proyecto, asociada a un evento en particular puede tener implicancias en las decisiones estratégicas del proyecto y deben ser evaluadas al inicio del proceso.

La definición del tipo de elementos prefabricados implica durante esta etapa, la evaluación de oportunidades y riesgos asociados a cada sistema y su impacto en el esquema y flujos de trabajo.

Dependiendo del tipo de proyecto, como por ejemplo vivienda social, van a variar los requerimientos normativos y restricciones del proyecto, lo que puede tener efecto en la elección del sistema, el nivel de prefabricación y los materiales.

Dependiendo del programa, el potencial de repetición del diseño y su producción en masa puede afectar la decisión del tipo de sistema prefabricado a ejecutar. Por ejemplo, en el caso de proyectos comerciales donde el diseño de la tienda deba ser replicado.

Finalmente, es relevante la definición del equipo de trabajo y empresa industrializadora colaboradora para la prefabricación de elementos y el tipo de contrato a utilizar, que permita el cumplimiento de funciones de manera óptima para la obtención de los resultados esperados.

3.1.2 Preparación y orientación

El desarrollo de esta etapa implica la definición de los objetivos del proyecto, considerando los resultados esperados, estándares de calidad y sustentabilidad, presupuestos, definición de organigramas y roles, modelo de negocio y tipos de contratos y la estrategia de entrega del proyecto.

Para la estrategia de trabajo se definen los estándares y metodologías de coordinación, plan de ejecución, junto con las bases tecnológicas que permitirán su desarrollo.

Se establecen requisitos para fomentar el enfoque DfMA y la innovación en el equipo de diseño, incluso a través de documentación. Se desarrollan estrategias de implementación del enfoque DfMA y su incorporación al Plan de ejecución BIM.

La definición de el o los elementos prefabricados a utilizar debe considerar su impacto en los equipos de trabajo y los roles y responsabilidades de cada colaborador dentro del proyecto.

Esta etapa implica la incorporación detallada del enfoque DfMA. El equipo de diseño debe considerar:

- Requerimientos del cliente que puedan impactar el diseño o flujos de trabajo.
- Qué procesos se utilizan actualmente en el sector objetivo.
- Disponibilidad y capacidades de la industria: La distancia entre la planta de prefabricación y el sitio de emplazamiento del proyecto puede tener fuertes repercusiones en el costo del proyecto, especialmente si se trata de un proyecto modular.
- Alternativas para incrementar la estandarización de elementos
- Condiciones del sitio de emplazamiento que puedan condicionar el diseño, como disponibilidad de espacio para almacenamiento de paneles y movimiento de la grúa o condiciones de accesibilidad al sitio. El estudio de estas variables debe ser realizado previo a la elección del sistema constructivo y el nivel de prefabricación.
- Escala y presupuesto del proyecto y las posibilidades para añadir valor al diseño a través del enfoque DfMA
- Soluciones más apropiadas para el proyecto, para montajes más eficientes. Entre ellas se recomienda:
    - Incorporar soluciones que minimicen el riesgo y aumenten la certeza en los tiempos de entrega
    - Incluir la estandarización, sin comprometer la creatividad
    - Automatizar la producción de información repetitiva, a través de la optimización del uso de BIM y la estandarización. Focalizar los tiempos y esfuerzos en elementos personalizados de cada proyecto.
    - Generar procesos de entrega simplificados, que generen información de manera efectiva, con el objetivo de enfocar la creatividad en aspectos que generen un valor agregado.
    - Enfocarse en la reducción de costos, evaluando los riesgos, la duración del proyecto, la reducción de retrabajos y formas de reducir los residuos generados.

3.1.3 Flujo de trabajo de diseño a prefabricación

Durante esta etapa se efectúa el traspaso de información desde el equipo de diseño hacia la empresa de prefabricación, lo que implica la definición de todos los aspectos necesarios para una correcta fabricación de elementos y la minimización de errores a futuro.

3.1.3.1 Desarrollo de diseño

Al comienzo de esta etapa debe estar definido el sistema prefabricado a utilizar, el nivel de prefabricación y la empresa industrializadora con la que se trabajará, debido a que estos aspectos guardan relación directa con algunas decisiones de diseño.

La generación de modelos detallados de las diferentes disciplinas permite la coordinación temprana y detección de problemáticas a resolver. Además, la fabricación de prototipos entrega la oportunidad de solucionar detalles de compleja ejecución y facilita el perfeccionamiento de diseños antes de comenzar la producción en masa.

3.1.3.2 Design Freeze

La aplicación de este concepto tiene como objetivo el avance seguro desde una etapa de diseño a otra y mitigar los riesgos asociados con el cambio para mejorar el rendimiento de los proyectos de construcción[30].

El término *Design Freeze* hace referencia al momento específico en que se decide de manera consensuada, el cierre de ciertos aspectos de diseño, para permitir el avance hacia otras etapas basándose en decisiones establecidas. De esta manera, se incrementa la certidumbre respecto a tiempos de entrega de proyectos. Diversos autores señalan el vínculo directo que existe entre retrasos y sobrecostos con la incorrecta implementación o gestión de cambios, por este motivo se releva la adopción de métodos para la reducción de cambios inesperados.

El proceso de diseño puede estructurarse según el orden de congelamiento del proyecto, por etapas. Un orden de diseño basado en congelamientos de partes evoluciona y se utiliza para planificar la fase de diseño detallado y reducir el riesgo de tener que rehacer trabajo. Si el proceso de diseño consta de muchas fases y tareas que se superponen, los congelamientos pueden establecer información preliminar como base para el trabajo futuro.

En algunos proyectos, el Design Freeze puede corresponder con la aprobación de planos para su fabricación en planta, mientras que, en proyectos de gran envergadura, su aplicación puede realizarse en diversas etapas del proceso de diseño. Aunque el término *Design freeze* suele asociarse con el final de la fase de diseño detallado, esta definición amplía su alcance para incluir cualquier parte o parámetro que se defina y se establezca durante toda la fase de diseño.

En proyectos industrializados, resulta fundamental congelar el diseño antes de iniciar la fabricación, para evitar trabajos adicionales en el sitio de construcción. Esto implica que el diseño debe estar completamente resuelto y acordado por todas las partes involucradas antes de que comience la prefabricación de elementos en la planta.

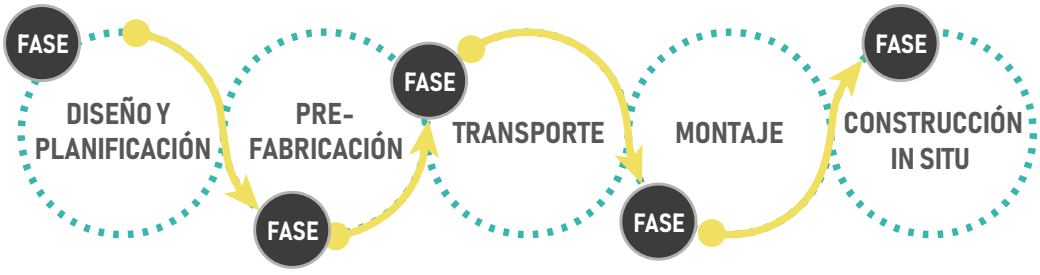


Figura 20. *Design Freeze en el proceso*

30. Hemal, Waidyasekara, y Ekanayake, «Integrating design freeze in to large-scale construction projects in Sri Lanka».

En el contexto de la prefabricación, su aplicación debe realizarse antes de comenzar la etapa de prefabricación de elementos. Como se observa en la Figura 11, el impacto que tiene la adopción de la prefabricación es variable, dependiendo de la etapa en la cual se encuentre el proyecto. En etapas iniciales de diseño se observa mayores beneficios derivados de la adopción e integración de la prefabricación para el diseño del proyecto, mientras que su integración tardía dentro del proceso de diseño presenta una disminución en los beneficios de su adopción.

3.1.4 Preparación de modelos BIM

El diseño integrado implica la coordinación de las diferentes especialidades que componen el proyecto, a través de modelos 3D en un entorno común de datos que permite visualizar los elementos proyectados, tales como soluciones constructivas, conexiones, ductería, shafts o aspectos de montaje.

Además de la visualización del diseño y planimetría, la modelación BIM permite generar documentación complementaria como listas de materiales, estimación de costos, planificación y gestión del tiempo, simulación energética y otros aspectos que permiten la toma de decisiones informada a lo largo del proceso y la implementación de soluciones.

3.1.5 Detección de interferencias

A través de la consolidación de información en modelos digitales, es posible garantizar la coordinación e integración de las diversas especialidades en un diseño donde encajen todos los elementos, para la optimización de resultados y reducción de contratiempos que usualmente pueden aparecer durante la construcción.

Algunos de los objetivos de la coordinación digital son:

- Optimizar el diseño, con ajustes en el modelo BIM para facilitar el montaje y construcción del proyecto.
- Reducir costos asociados a diseños poco eficientes y montajes no optimizados.
- Incrementar la eficiencia en el proceso para el cumplimiento de los plazos del proyecto.
- Resolución eficiente de problemas, a través de la comunicación y traspaso de información de manera fluida.
- Asegurar el cumplimiento de normativas, que pueden implicar estrictas restricciones, estándares de seguridad y coordinación entre especialidades.
- Chequeo constructivo y viabilidad de soluciones constructivas a través de revisión del modelo

3.1.6 Desarrollo de detalles y documentación para prefabricación

Comprende la generación de planimetría y documentación para la fabricación de elementos. Se recomienda la generación de planos de fabricación a partir de modelos 3D e integrar aspectos de la fabricación en ellos.

El ingreso de viviendas industrializadas tipo implica la entrega de antecedentes generales y antecedentes de industrialización (ver Anexo 1). Para la preparación de estos antecedentes es relevante considerar que existen diversos tipos de planimetría con información y objetivos diferentes.

1. Planos de arquitectura
2. Planos de cálculo estructural
3. Planos de especialidades
4. Planos de fabricación
5. Planos de montaje
6. Planos As-Built

7. Planos para mantención del activo
8. Planos de desmontaje

A excepción de los planos as-built, todos los otros planos deben ser preparados en la etapa de diseño y no deberían sufrir modificaciones en etapas posteriores, debido a que la información contenida en ellos se encuentra vinculada con otras áreas de trabajo.

3.1.7 Aprobación de diseño

En el marco del flujo de trabajo de la construcción industrializada, la toma de decisiones y la aprobación del diseño antes de comenzar la fase de prefabricación es crucial para aprovechar las ventajas que presenta la industrialización.

En primer lugar, los costos y el presupuesto del proyecto dependen en gran medida de un diseño bien planificado y aprobado por las partes interesadas. Realizar cambios en el diseño una vez que la producción está en marcha puede resultar costoso y perturbar el flujo del proyecto. La toma de decisiones tempranas garantiza que los recursos se utilicen de manera eficiente y que los costos imprevistos se reduzcan al mínimo. La eficiencia de un diseño generado en etapas iniciales podría verse alterada con estas modificaciones y derivar en una mayor generación de residuos y desperdicio de materiales, que también repercute en el costo de un proyecto.

Por otro lado, la eficiencia en la construcción industrializada es esencial, y la aprobación del diseño antes de la prefabricación facilita una planificación precisa del tiempo y la programación de procesos. Los retrasos causados por modificaciones de diseño en pleno proceso de prefabricación pueden afectar significativamente el cronograma del proyecto y los plazos de entrega estipulados.

Una vez que el diseño es aprobado, la fase de prefabricación se desarrolla de manera eficiente, de acuerdo a lo planificado. La empresa prefabricadora puede producir elementos estandarizados y de calidad sin interrupciones constantes debido a cambios de diseño que signifiquen períodos de incertidumbre. Además, se garantiza el cumplimiento de estándares y regulaciones verificados en la etapa de diseño.

Finalmente, tener un diseño sólido antes de la prefabricación contribuye a fortalecer las relaciones contractuales en la industria de la construcción. La capacidad de entregar proyectos de manera eficiente y dentro del presupuesto y los plazos establecidos favorece la consolidación de empresas y las relaciones con los clientes y las partes interesadas.

La aprobación del diseño antes de la fase de prefabricación son la base para el éxito de los proyectos de construcción industrializada, asegurando eficiencia, calidad y cumplimiento de estándares. Evitan problemas costosos y retrasos, contribuyen a la imagen de la empresa y facilitan la colaboración de todos los involucrados en el proyecto.

La industrialización supone un cambio de paradigma, alterando la matriz de responsabilidades de la construcción tradicional. Debido al alto grado de coordinación que requiere este tipo de proyectos, especialmente en la fase de diseño, cada profesional tiene la responsabilidad de aprobar el diseño general y además cada uno de los proyectos de especialidades, una vez que han sido resueltas las interferencias y cada proyecto posee viabilidad. Este grado de coordinación y validación son fundamentales para asegurar la fluidez y eficacia en la ejecución de proyectos industrializados.

Figura 21. *Prototipo de revestimiento exterior Torre Peñuelas*

Figura 22. *Prototipo de solución constructiva Torre Peñuelas*

3.2 Prefabricación

Parte importante de esta etapa depende de fases anteriores, específicamente del diseño detallado de elementos prefabricados. Para una correcta ejecución de esta etapa se debe generar la documentación y planimetría necesaria con detalles técnicos de todos los elementos y todas las capas de información que contiene cada uno, plasmadas en los planos de fabricación. La generación de esta información depende del coordinador del proyecto, que centraliza la información desde las diferentes especialidades que componen un panel o módulo (proyectos de arquitectura, cálculo estructural, eléctrico, entre otras). Por otro lado, la consideración de las características de la línea de producción de la planta prefabricadora permite el diseño optimizado de elementos para una fabricación eficiente.

Las herramientas digitales permiten anticipar interferencias o errores en el diseño como discontinuidad de ductos, descalces de elementos estructurales o de terminación, entre otros contratiempos que podrían retrasar la obra. El uso de software de coordinación BIM o CAD/CAM facilitan el desarrollo de proyectos y la disminución de errores en el proceso y los traspasos de información desde equipos de diseño al equipo de la empresa industrializadora encargada de la prefabricación de elementos.

3.2.1 Fabricación de elementos

La ejecución de esta etapa está a cargo de la empresa industrializadora, que a partir de la información contenida en planos de fabricación realiza la manufactura de elementos.

La estrategia de trabajo puede considerar la ejecución de prototipos para la validación de diseño, pruebas de rendimiento y costos, identificación de problemas y verificación de innovaciones en soluciones constructivas, conexiones, montaje entre otros aspectos que puedan incrementar el nivel de prefabricación de elementos o mejorar la calidad de los resultados. Esta maniobra no es excluyente y puede complementarse con la validación a través de modelos digitales del proyecto.

La conclusión de esta etapa se da con la finalización en la fabricación de todos los elementos, que puede realizarse en etapas dependiendo del volumen de producción. Para la construcción de barrios residenciales, la fabricación implica una coordinación directa con la empresa constructora que ejecuta fundaciones y/o montaje de elementos por fases, para el cumplimiento de plazos establecidos en la carta Gantt del proyecto.

3.2.1.1 CAD/CAM madera

Como se menciona anteriormente, la coordinación entre equipos de trabajo es fundamental para el desarrollo de proyectos industrializados. En este sentido, la interoperabilidad de archivos en las etapas de diseño y de fabricación permiten una mayor fluidez en la comunicación y traspasos de información.

Existen diversos software disponibles que permiten el desarrollo de proyectos en madera, la interoperabilidad en el entorno BIM y la integración de funciones para CNC (Control Numérico Computarizado). Los software más utilizados son:

Cadwork
Sema
HBS Cad
Dietrich's

Su aplicación comprende el entramado ligero y madera masiva y permiten la generación tanto de módulos como paneles de muro, entrepisos, techumbres, escaleras y fundaciones. Además, entregan la posibilidad de generar secuencias de montaje y en algunos casos instrucciones de izaje y montaje.

El uso de estos software entrega la posibilidad de generar instrucciones directas para máquinas CNC de manufactura. Junto con esto, en etapas de diseño poseen la capacidad de exportar archivos IFC para el traspaso de información entre actores. La capacidad de abordar las etapas de diseño, prefabricación e incluso transporte y montaje posibilita un flujo de información continuo entre estas etapas, donde hay diversos equipos de trabajo avanzando de manera simultánea.

3.2.1.2 Planos de fabricación

Los planos de fabricación o *shop drawings* son la planimetría generada para ser utilizada por los trabajadores de la planta industrializadora para la fabricación de elementos prefabricados. Estos planos son diferentes y adicionales a los generados por arquitectura o estructura, debido a que contiene información que puede ser proporcionada por más de un área de trabajo y posee fines diferentes.

Esta planimetría está enfocada en proporcionar detalles técnicos e información específica para la fabricación de elementos prefabricados. Este set de planos tiene como fin el de facilitar el trabajo en planta y entregar la información necesaria para comprender el diseño y conformación de paneles, módulos o cualquier otro elemento prefabricado.

La elaboración de esta planimetría requiere la inclusión de información como dimensiones, espaciamientos, la ubicación exacta de ductos y perforaciones necesarias, dimensionamiento de vanos, pliegues, segmentaciones, rebajes, cortes y cualquier detalle que haya sido proyectado para su ejecución en fábrica. Por lo tanto, contiene información proporcionada tanto por los equipos de arquitectura, estructura y especialistas, y su nivel de detalle dependerá del grado de industrialización de los elementos que conforman el proyecto.

Las tolerancias en el diseño entregan la posibilidad de adaptar los elementos ante posibles descuadres o desajustes de obra, sin embargo, a lo largo del proyecto pueden surgir diversos inconvenientes provenientes de una ejecución deficiente o no ajustada a las indicaciones iniciales.

La correcta fabricación de estos detalles permitirá la exitosa ejecución y montaje del proyecto y siempre debe contener consideraciones provenientes de la empresa industrializadora, en relación a aquello que se puede o no hacer con la maquinaria y tecnología disponible, junto con los tiempos estimados. La entrega final de planos debe contar con la revisión de la empresa prefabricadora o ser realizados por la empresa si corresponde.

La preparación y generación de esta planimetría es una parte importante del proceso y debe contar con revisiones que aseguren la detección de interferencias y que los dibujos contienen la información necesaria. Por otro lado, esta instancia de revisión permite verificar la inclusión de consideraciones constructivas y de montaje.

La generación de esta planimetría debe estar considerada desde el inicio del proyecto, indicando específicamente el responsable de su generación y la información que debe contener cada plano.

El nivel de detalle de estos planos puede variar en cada proyecto, pero siempre deben contener las instrucciones necesarias para la fabricación de elementos con todos los detalles de dimensiones, cortes, materiales y los detalles constructivos que permitan el montaje de los ele-

mentos en el sitio. Además, van a permitir realizar el chequeo de calidad con la claridad de la composición de cada elemento fabricado.

3.2.2 Control de calidad

Debido a la diversidad de actores involucrados en los procesos de prefabricación, los elementos deben ser ver revisados para verificar la calidad de la fabricación y el cumplimiento de los requerimientos establecidos por diseño en los planos de fabricación. El proceso puede realizarse mediante una inspección visual para verificar aspectos como como grietas, abolladuras, desalineaciones o problemas de acabado.

El control de calidad de elementos prefabricados es un proceso esencial para garantizar la calidad y la seguridad en la construcción industrializada. La implementación de procedimientos de control de calidad efectivos contribuye al éxito del proyecto y reduce los riesgos y costos asociados con problemas de calidad.

El control puede incluir los siguientes aspectos:

- **Mediciones y tolerancias:** Se realizan mediciones para asegurar que las dimensiones de los elementos se ajusten a las tolerancias especificadas en el diseño.

- **Pruebas de calidad:** Se llevan a cabo pruebas específicas según las características de los elementos. Esto puede incluir pruebas de resistencia, pruebas de carga, pruebas de estanqueidad, pruebas de aislamiento, entre otras, dependiendo del tipo de elemento.

- **Estado de los materiales de terminación:** Verificar que los materiales de terminación instalados en cada elemento se mantengan en buen estado y hayan sido instalados de la manera proyectada para soportar las cargas ejercidas durante el proceso de transporte.

- **Solución constructiva:** El elemento prefabricado debe estar compuesto por todas las capas de materiales especificadas en los planos de fabricación, con las respectivas membranas o terminaciones detalladas.

- **Calidad de las conexiones:** Verificar que no sobresalgan tornillos, clavos u otros elementos de conexión que puedan perjudicar la calidad de los materiales durante el proceso de transporte o el correcto ensamble de elementos en la etapa de montaje.

- **Pruebas de funcionalidad:** En el caso de módulos, puede ser necesaria la verificación del funcionamiento de elementos integrados como extractores de aire, sistemas eléctricos u otros elementos incluidos en la solución.

Durante el proceso es importante la documentación y registro de los resultados de todas las pruebas y revisiones de calidad. Esto proporciona un detalle de la calidad de cada elemento y permite el seguimiento de problemas y soluciones para mejorar la fabricación de elementos en el futuro. El levantamiento de problemáticas permitirá hacer seguimiento en etapas posteriores del proceso, a partir de la información generada en esta etapa.

Basándose en los resultados de las pruebas y la inspección, los elementos se aprueban para su uso o se rechazan si no cumplen con los estándares de calidad y deben ser reparados o descartados en el caso de presentar desajustes importantes que impidan la correcta ejecución de etapas posteriores o arriesguen la seguridad de la edificación.

Los controles en planta y/o en obra consideran las tolerancias máximas establecidas para cada elemento, de manera de asegurar la correcta ejecución del montaje.

Figura 23. *Transporte e izaje de elementos Torre Peñuelas*

Figura 24. *Montaje de módulos Torre Peñuelas*

3.2.3 Embalaje

Los elementos prefabricados son fabricados en una ubicación diferente a la del lugar de construcción. El embalaje adecuado protege los elementos de daños durante el transporte, que puede incluir movimientos, cargas y descargas.

En casos ideales, el montaje de elementos se realiza el mismo día en que llegan los elementos prefabricados, sin embargo, por diversos motivos puede retrasarse y requerir el almacenaje de elementos en el sitio. En estos casos, los elementos pueden ser vulnerables a daños físicos o deterioro si no se almacenan y transportan adecuadamente. El embalaje proporciona una capa de protección que minimiza los riesgos de daño e incertidumbre o retrasos asociados a la reparación o reemplazo de elementos, que puede significar un costo no contemplado.

Cada elemento debe contar con un etiquetado para su identificación por los equipos de montaje y construcción, lo que reduce tiempos y facilita la ejecución de los trabajos en el sitio.

Un embalaje adecuado asegura que los elementos lleguen al lugar de construcción en óptimas condiciones, listos para su instalación, lo que contribuye al éxito del proyecto. Además, es un elemento importante en la gestión de la cadena de suministro y en las prácticas en la construcción.

3.2.4 Documentación para montaje

El éxito de un proyecto puede depender de la correcta ejecución del montaje de elementos y se requerirá la competencia y calificación de los equipos de trabajo a cargo. Para esto, es necesario generar la documentación necesaria para hacer el traspaso de información y coordinación entre los equipos de diseño y equipos de montaje.

La vivienda industrializada tipo considera la generación de antecedentes de industrialización como instrucciones de manipulación, izaje y montaje y deben considerar todos los detalles necesarios para que la ejecución se realice de acuerdo a lo proyectado y cumplir con las normativas asociadas.

La generación de esta información ayuda a los equipos de construcción a comprender rápidamente cómo se deben ensamblar los elementos prefabricados y reduce la posibilidad de errores en el proceso de construcción. La documentación bien elaborada agiliza el proceso de montaje y los equipos pueden trabajar de manera más eficiente, reduciendo el tiempo y los costos de construcción. Además, puede permitir el aprendizaje de nuevos miembros del equipo, al tener una guía detallada para seguir.

La disponibilidad de instrucciones respecto a la secuencia constructiva facilita la ejecución de tareas, resguardando la seguridad y calidad de los elementos, lo que aumenta su durabilidad.

La documentación generada proporciona una base para la retroalimentación y mejora continua. Si se encuentran problemas durante el montaje, se pueden realizar ajustes en la documentación para futuros proyectos, lo que mejora la eficiencia y la calidad de los procesos. Por otro lado, la documentación también actúa como un registro histórico del proyecto, lo que puede ser útil para futuras obras de mantención o renovaciones.

3.3 Transporte

Debido a la diversidad de actores que participan en el transporte y montaje de un proyecto, un aspecto clave para una ejecución exitosa de estas etapas es la coordinación entre equipos. La entrega de elementos y otros elementos (materiales de terminación, conectores, artefactos sanitarios o eléctricos, entre otros que pueden formar parte del kit de entrega) en los plazos y condiciones establecidas, la disponibilidad de equipos de trabajo, herramientas y maquinarias adecuadas para el izaje de elementos de peso y dimensiones determinadas previamente son variables a considerar para disponer las condiciones necesarias.

Durante estas etapas la coordinación involucra a mandante, empresa industrializadora, especialistas, constructora a cargo de labores en el sitio de emplazamiento, equipo de transporte y equipo de montaje.

3.3.1 Transporte

El objetivo principal durante esta etapa es ejecutar el traslado adecuado y optimizado para el tipo de solución empleada y conservar íntegramente los elementos que componen los paneles o módulos. El uso de herramientas digitales para la planificación del traslado debe complementarse con el análisis de todas las condiciones del camino desde la planta prefabricadora hasta el sitio de emplazamiento del proyecto, que en algunos casos puede considerar caminos rurales o calles con dimensiones reducidas.

Dentro de los antecedentes de industrialización requeridos para el ingreso de viviendas industrializadas tipo (Resolución 59), en relación a esta etapa se solicitan:

- **Detalles constructivos:** Entre otros antecedentes, se requieren antecedentes como el tipo de camiones a utilizar para el traslado de elementos prefabricados, su tonelaje, dimensiones, accesos a la obra, sector de acopio, condiciones del camino, entre otros antecedentes que sean pertinentes a estas labores.

- **Instrucciones de manipulación:** Indicaciones respecto a la forma correcta en que se debe manipular los elementos en el proceso de traslado, almacenaje e instalación.

- **Instrucciones de acopio:** Para casos donde los elementos no sean instalados inmediatamente al momento de descarga, se deben detallar las condiciones en que se debe almacenar los elementos.

3.3.2 Control de calidad

Debido a los impactos que pueden recibir los elementos durante las fases de transporte, izaje y montaje, existe la necesidad de implementar sistemas de control de la calidad de los elementos. A través de la verificación del estado de elementos existe la posibilidad de aumentar el control de procesos y generar mejoras en la calidad de las viviendas y la reducción de problemas de posventa.

El control de esta etapa puede considerar los mismos detallados en el punto 3.2.2.

El ingreso de una vivienda tipo industrializada considera la entrega de instrucciones de reparación (por la empresa industrializadora) para elementos que puedan haber sufrido daños durante el traslado.

3.4 Montaje

Para obtener las ventajas de la industrialización se recomienda la incorporación de soluciones que faciliten la rapidez del montaje en obra y la conexión entre elementos prefabricados con aquellos ejecutados en obra. La consideración de soluciones debe estar acompañada de un análisis de las condiciones en obra, tales como la mano de obra disponible en la región y la calificación requerida para la ejecución del montaje.

El uso de conexiones complejas que requieran herramientas o conocimiento específico pueden ser beneficiosas en plazos y la calidad de los resultados, cuando se consideran todas las variables asociadas para una ejecución exitosa.

La secuencia de montaje propuesta en cada proyecto responde a un análisis que considera rapidez constructiva, estabilidad estructural de los elementos, disponibilidad y optimización de maquinaria, herramientas y trabajadores, entre otros factores. Es indispensable seguir la secuencia de montaje propuesta y no generar modificaciones en la obra, debido a que pueden generar confusiones y errores en el proceso.

Cada elemento prefabricado debe poseer una identificación, por ejemplo, en el caso de paneles, debe estar identificada la orientación de cada cara (si es un panel de muro perimetral determinar cuál es la cara interior y la exterior) y su desmontaje del camión debe responder a su ubicación en la secuencia de montaje.

Hacer seguimiento del proceso, a partir de la secuencia de montaje planificada y todos los recursos de planificación generados. Al terminar la obra, validar el montaje y actualizar modelos de acuerdo a las obras ejecutadas.

En relación a esta etapa, el ingreso de viviendas industrializadas tipo considera la entrega de:

- **Instrucciones de izaje:** Detalle de los procedimientos de izaje del elemento o elemento, indicando si es necesaria maquinaria especializada. Además, indicaciones de los puntos de izaje y la información correspondiente para un traslado e instalación segura.

- **Instrucciones de montaje:** Instrucciones proporcionadas por el fabricante que detallen el montaje y la instalación del sistema. Se recomienda la generación de una lista de verificación del montaje e instalación de partes y aspectos críticos, incluyendo especificaciones de tolerancias, secuencia de montaje y cualquier información relevante para asegurar que el montaje en el sitio cumpla con las normas existentes.

- **Instrucciones de reparación:** Recomendaciones para la evaluación y reparación de daños en terreno, teniendo en cuenta la disponibilidad de piezas de repuesto y el grado de interconexión entre los diferentes elementos del sistema.

- **Instrucciones particulares del elementos o elemento:** Información específica del elemento o elemento fundamental para su puesta en obra.

3.5 Construcción en el sitio

La etapa de construcción en el sitio es crucial para transformar los elementos prefabricados en una edificación funcional y lista para su uso. Una planificación y ejecución cuidadosas son esenciales para garantizar que el proyecto se complete con éxito, cumpla con los estándares de calidad y seguridad, y cumpla con los plazos y el presupuesto establecidos.

Posterior al proceso de montaje, la edificación considera la ejecución de trabajos complementarios o que no formaron parte de los elementos prefabricados. Durante esta etapa es relevante la coordinación de equipos de trabajo para llevar a cabo las tareas en los plazos establecidos.

Después de que los elementos prefabricados se han montado, es fundamental asegurar que estén debidamente unidos y conectados. Esto implica la conexión estructural, de sistemas eléctricos, sanitarios, u otros sistemas según sea necesario. La conexión de pernos, tornillos, adhesivos u otros métodos de unión pueden ser utilizados, dependiendo de los elementos y el diseño del proyecto.

Una vez que las conexiones estructurales y de servicios fueron realizadas, se realizan trabajos de acabado en el interior y el exterior de la obra. Esto puede incluir la instalación de revestimientos de muros, pintura, instalación de pavimentos, carpintería, entre otros. Los elementos prefabricados pueden venir con acabados parciales, pero es en esta etapa donde se completan.

Luego de la ejecución de las obras, es necesario realizar pruebas y verificaciones exhaustivas para garantizar que todos los sistemas funcionen correctamente. Esto es fundamental para garantizar la seguridad y la eficiencia de la edificación. Se pueden realizar pruebas de presión, pruebas de fugas, pruebas eléctricas, entre otras.

3.5.1 Inspección final

Al final la obra, se programan inspecciones de construcción y se solicita la recepción de obra. Esto es fundamental para cumplir con las normativas municipales, la Ordenanza general de urbanismo y construcciones y las resoluciones asociadas a la ejecución de viviendas con financiamiento estatal.

3.5.2 Entrega al cliente o usuario final

Una vez que se completa la construcción en el sitio, la vivienda se entrega al cliente o usuario. Esto puede implicar una revisión final con la contraparte para asegurar que se cumplan todas las especificaciones de diseño.

3.6
Entrega de información para mantención, operación y desmontaje

Figura 25. *Mantención de fachadas industrializadas*

La vida útil y calidad de una edificación industrializada puede extenderse en la medida en que se realicen labores que lo permitan. A partir de la documentación generada durante las etapas previas es posible generar instrucciones de mantención y operación que permitan un desempeño eficiente de la edificación.

La evaluación en tiempo real del desempeño de edificios con gemelos digitales, por ejemplo, posibilita la mejora continua y optimización del diseño en próximos proyectos. A partir de las lecciones aprendidas desde la etapa operativa, las decisiones se orientan a mejoras en el desempeño, considerando el ciclo de vida completo de un proyecto.

3.6.1 Documentación As-built

A diferencia de los planos de fabricación, los objetivos de la planimetría y documentación as-built tienen relación con las etapas de operación y mantención del proyecto y permiten tener trazabilidad de un proyecto con la información actualizada respecto a cambios que podría haber sufrido el diseño en las fases de montaje y construcción. Permite identificar la ubicación de sistemas, ductos, cables y tuberías, lo que facilita las labores de mantención y reparación.

3.6.2 Documentación final para operación y mantención

Actualizar el modelo de la edificación, de acuerdo a cambios realizados en obra permite contar con información valiosa que posibilita la toma de decisiones informada durante su uso y mantención.

Se recomienda la generación de un manual de mantención, que corresponde a un documento que proporciona instrucciones detalladas sobre cómo mantener y operar el edificio de manera eficiente y segura. Incluye información sobre cada sistema y elemento, como sistemas eléctricos, sistemas de climatización, sistemas sanitarios, estructura de la edificación, entre otros. Este manual proporciona una referencia completa para los encargados de mantención, que permitirá la extensión de la vida útil de la edificación.

El ingreso de viviendas industrializadas tipo considera entre los antecedentes de industrialización, la entrega de un Manual de uso, cuidado y mantención para el usuario, que contenga aspectos mínimos como:

- Descripción del sistema de edificación
- Precauciones de uso y mantención
- Fijaciones de muebles y similares
- Colocación de protecciones metálicas en ventanas
- Abertura de nuevos vanos para puertas y ventanas
- Otros pertinentes a la solución constructiva

3.6.3 Desmontaje

En proyectos donde se considere la reutilización de elementos, debe incorporarse la información necesaria para la ejecución del desmontaje y el posterior montaje en otro proyecto o lugar, ya sea información técnica como la requerida para la contratación de servicios y la generación de contratos.

Cuando se proyecte el desmontaje de un proyecto, el equipo de diseño debe proporcionar información para que los responsables del desmontaje puedan comprender la estructura y cualquier característica que permita facilitar el desmontaje, así como aspectos que requieran técnicas o secuencias inusuales.

4

El futuro de la industria

4.1

Nuevos tipos de relaciones contractuales

Como presenta el reporte de McKinzey & Company[31], la construcción industrializada implica un cambio significativo en la industria, al llevar el proceso de construcción actual basado en proyectos hacia un enfoque basado en productos. Frente a la idea de construir proyectos únicos y personalizados en el sitio de emplazamiento, la construcción industrializada implica un traspaso de labores hacia la planta de prefabricación. Esto comprende la fabricación de elementos estandarizados, en una línea de producción que puede considerar también opciones de personalización. Para lograr una producción eficiente y mejorar mediante la repetición, los equipos de diseño, empresas industrializadoras y constructoras pueden especializarse en segmentos de usuarios finales. Todo esto implica el surgimiento de modelos de negocios basados en datos que aprovecharán la información disponible para propiciar una mejor toma de decisiones y asegurar el cumplimiento de procesos.

La coordinación temprana observada en proyectos de construcción industrializada propone la integración de actores, con el objetivo de considerar cada una de las visiones y proyectar un objetivo en común. La integración disciplinaria implica nuevos tipos de contrato, que definen tiempos y alcances diferentes a los de la construcción tradicional. Estos nuevos modelos implican la participación temprana y simultánea tanto de diseñadores, ingenieros, equipos de especialistas, empresa industrializadora, proveedores, empresa constructora, transportistas y montajistas.

A diferencia de los modelos de construcción tradicional, la integración temprana implica nuevas responsabilidades y alcances dentro del proceso y los contratos son una herramienta que brinda claridad respecto a los alcances en las labores de cada colaborador, rango de intervención, relación con otros participantes, riesgos, métodos de compensación y en general, las relaciones contractuales para llevar un proceso constructivo conforme a lo planificado. Por otro lado, estos modelos de gestión implican en todos los casos un coordinador de proyecto cuyo rol es centralizar la toma de decisiones. La definición del tipo de contrato a utilizar con cada parte se vincula con los objetivos de cada proyecto y las capacidades de los equipos y requiere una evaluación preliminar para su correcta implementación.

No existe un modelo ideal universal de adjudicación y cooperación para la construcción industrializada en madera, sino que cada modelo de acuerdo a las características iniciales debe seleccionar un modelo adecuado y adaptarlo si

31. McKinsey & Company, «The next normal in construction How disruption is reshaping the world's largest ecosystem».

es necesario. Los criterios de selección del modelo se basan en las posibilidades de cooperación, el alcance de influencia del cliente y el nivel de dificultad del proyecto.

De acuerdo a lo propuesto por Jerker Lessing y otros autores[32], la construcción industrializada de viviendas se compone por 8 áreas, entre las cuales se encuentran las relaciones a largo plazo y la medición del desempeño y reutilización de experiencias, lo que da a entender la relevancia de estas áreas dentro de la estrategia de trabajo para definir el nivel de implementación de la industrialización.

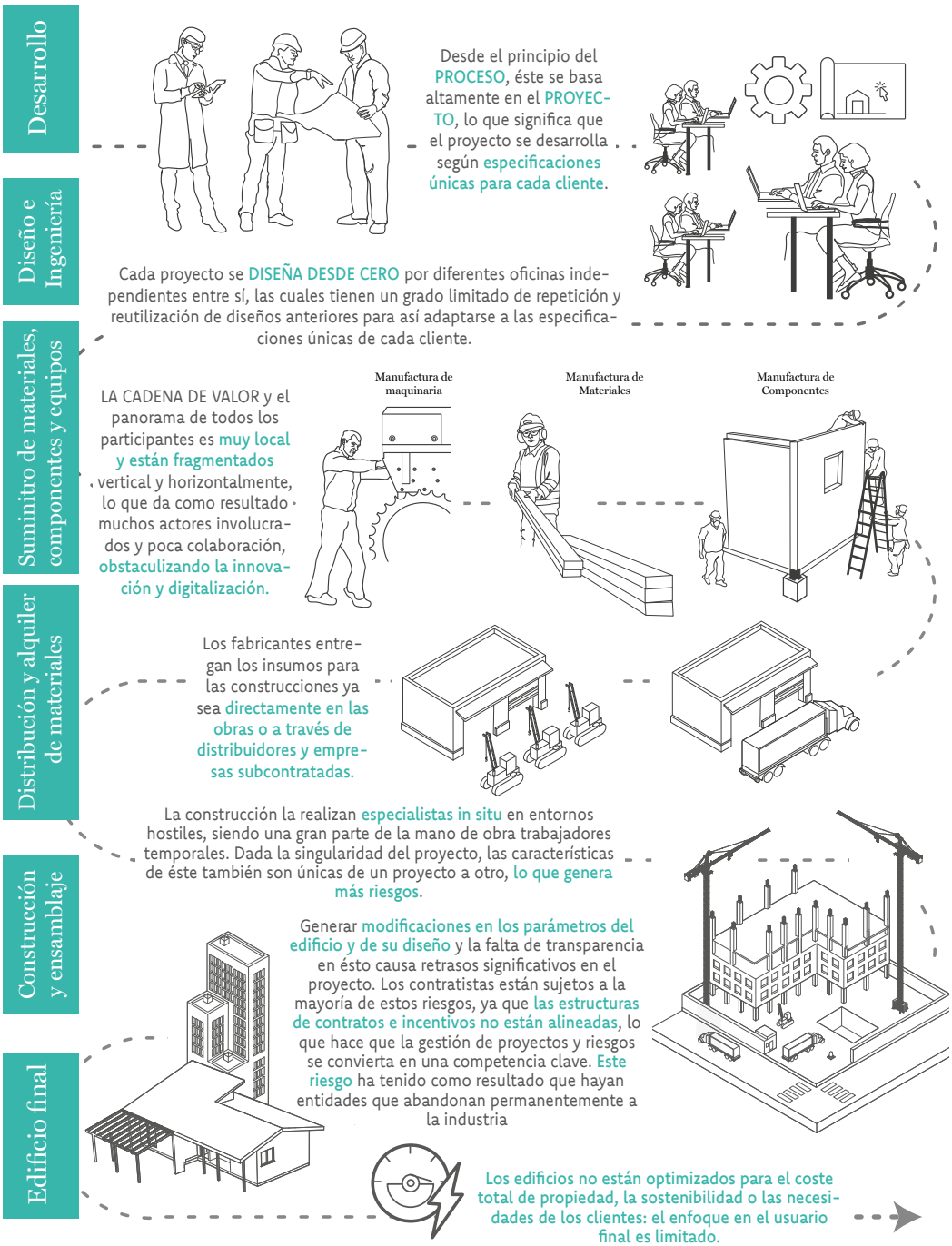


Figura 26. *Ecosistema de la construcción hoy*

32. Lessing, Stehn, y Ekholm, «Industrialised housing: Definition and categorization of the concept».

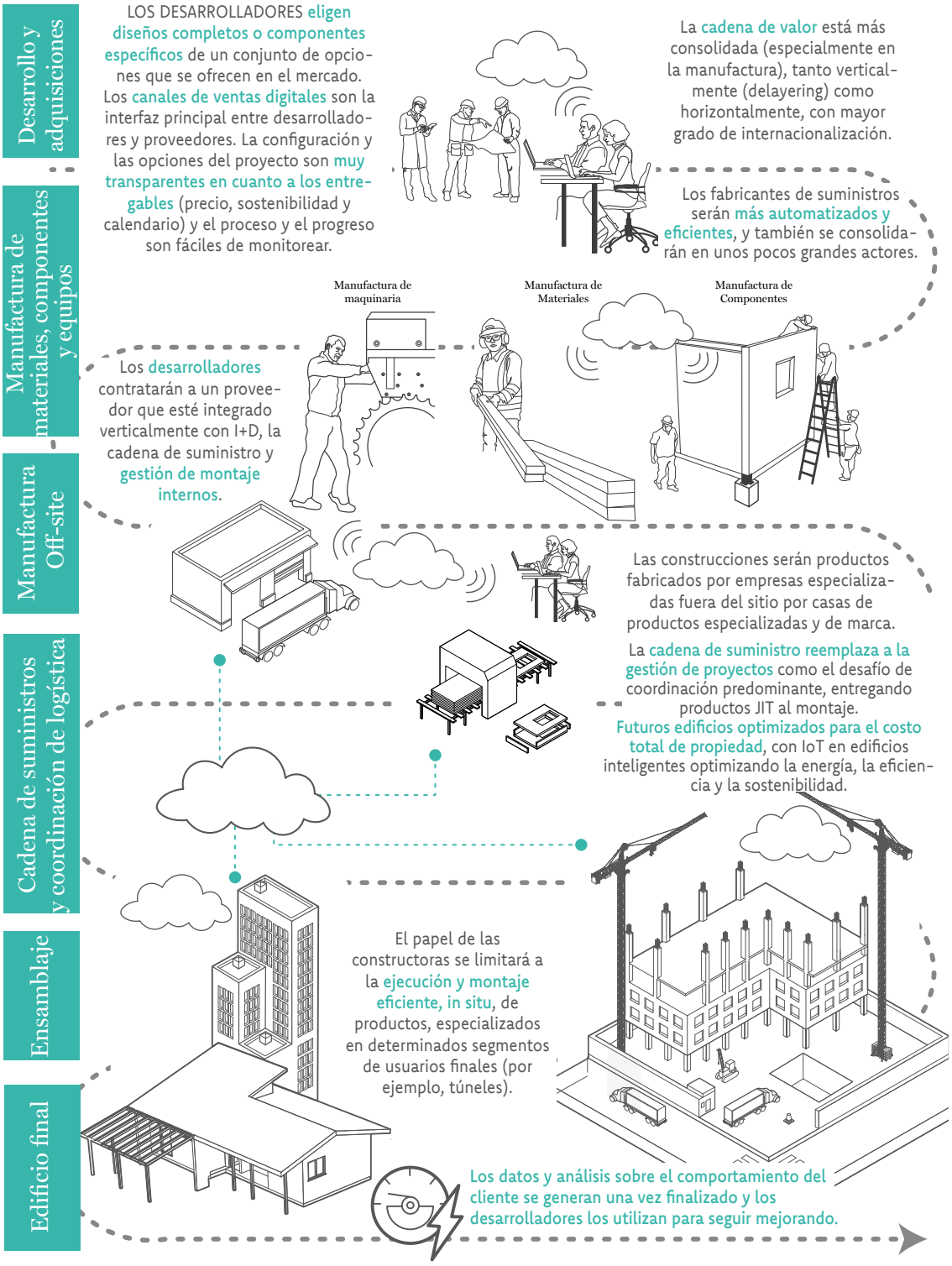


Figura 27. *Ecosistema de la construcción en el futuro*

4.2
Manufactura avanzada

La transformación digital, conocida como Industria 4.0 representa la siguiente fase en la digitalización del sector de la manufactura y nace impulsada por el impacto de la tecnología digital y el procesamiento de datos.

Junto con la implementación de máquinas y dispositivos más inteligentes, se pueden obtener ventajas como mayor productividad, eficiencia en el uso de recursos y reducción de residuos generados.

La implementación de nuevas tecnologías implica una actualización constante en las habilidades y entrenamiento de los trabajadores de una empresa, con el objetivo de facilitar las funciones que desarrollan y obtener la máxima ventaja de la implementación de nuevas tecnologías. El ritmo de actualización de las tecnologías debe ser acompañado por la preparación y reentrenamiento de los trabajadores y la contratación de nuevos profesionales cuando sea necesario.

Entre los pilares de la Industria 4.0 destacan por su aplicación en la construcción industrializada en madera:

- **Inteligencia artificial:**
  El análisis de datos desarrollado por sistemas de inteligencia artificial permite la optimización de procesos y la gestión de proyectos, tanto en etapas de planificación como en etapa de mantención.

- **Automatización- robotización:**
  Las ventajas en la incorporación de tecnologías de automatización de procesos se pueden ver en la producción en masa, pero, además, se incorpora la oportunidad de personalización y flexibilidad en los diseños. Los sistemas automatizados pueden ser adaptados para generar diversas alternativas de diseño de un elemento, sin alterar significativamente la línea de producción.

  El uso de maquinaria automatizada permite también el montaje de elementos, donde es posible alcanzar gran precisión y calidad en los resultados.

- **Realidad virtual:**
  La digitalización de proyectos entrega diversas posibilidades para el desarrollo de proyectos. Durante la etapa de diseño facilita el trabajo colaborativo, permite la visualización del proyecto, detección de problemas de diseño y la evaluación de posibles soluciones. Para etapas posteriores facilita la visualización de soluciones para el transporte y la optimización de la secuencia de montaje de los elementos (paneles, módulos, POD's o cerchas) y su interacción con las obras desarrolladas en el sitio, como fundaciones o conexiones de ductos.

  La información generada a partir de modelos 3D también permite la documentación y posterior evaluación y mejora de soluciones.

- **Realidad aumentada:**
  A través de la superposición de modelos 3D en entornos reales, es posible la visualización de diseños y elementos en el espacio existente. La posibilidad de ver objetos en el mundo real facilita a los trabajadores la comprensión de soluciones para la instalación de elementos de manera precisa y posteriormente el control de las obras ejecutadas.

- **Gemelos digitales:**
  La representación digital de edificios permite el monitoreo de su desempeño en tiempo

real, lo que facilita la mejora continua de soluciones de diseño para la etapa constructiva y posteriores etapas de operación y mantención. El alcance del modelo puede ser variado, desde la visualización en tiempo real, simulaciones y análisis, optimización de operaciones y mantención de un edificio, integración con sistemas de gestión del edificio y mejoras en el desempeño energético.

El uso de gemelos digitales permitiría mejorar su eficiencia y la mejora continua en proyectos industrializados.

Durante la etapa de fabricación, la simulación de la línea de producción entrega antecedentes para detectar posibles inconvenientes y mejorar la eficiencia en la producción.

En la etapa de transporte, el gemelo digital entrega la posibilidad de planificar la logística del transporte desde la carga de camiones hasta la descarga en el sitio.

Durante el montaje, los gemelos digitales entregan información visual respecto a la lógica y secuencia de montaje de los elementos, que facilita el entendimiento de los equipos que desarrollan esas labores.

Durante las etapas posteriores, los gemelos digitales permiten monitorear el funcionamiento de los edificios y facilitar las labores de mantención y predicción de errores.

- **Internet de las cosas (Internet of Things: IOT):**
  La posibilidad de generar redes interconectadas con equipos de monitoreo y transmisión de datos en tiempo real, abre diversas oportunidades para generar procesos de mejora continua en el desempeño de edificios. Este aspecto es clave en la construcción industrializada, donde uno de los objetivos es la optimización y mejoras en la eficiencia.

  A través de la disposición de datos, es posible el análisis de casos y la toma de decisiones informadas para la etapa de prefabricación y la etapa operativa. Esto, con el fin de mejorar diversos aspectos en el caso de la etapa operativa, como la experiencia del usuario, mantención preventiva, eficiencia energética y la evaluación general de proyectos, para la generación de mejoras en soluciones de futuros proyectos.

  En la etapa de prefabricación, la disposición de datos permite la optimización de procesos en fábrica y durante la obra.

PARTE II

A continuación, se presentan las consideraciones técnicas constructivas para desarrollar proyectos industrializados, con miras a aspectos normativos, de funcionamiento y de calidad. Además, se presenta la reglamentación asociada a proyectos de vivienda industrializada con financiamiento estatal. A través de diversos casos de estudio, se evidencian las particularidades de la construcción industrializada y las ventajas que es posible obtener.

1

Consideraciones para el diseño de proyectos industrializados

El diseño de soluciones constructivas implica la consideración de diversos aspectos para determinar sus características, con el foco siempre en la ejecución de proyectos industrializados en entramado de madera. Dentro de los requerimientos, se encuentran principalmente: estructurales, requerimientos de resistencia al fuego, térmicos y acústicos, diseño de envolvente, incorporación de instalaciones, aspectos del transporte, montaje y desmontaje de la estructura.

Si el objetivo del proyecto es aprovechar las ventajas de la industrialización, se releva el uso del enfoque DfMA para guiar la toma de decisiones, con la aplicación de criterios en función de los objetivos específicos del proyecto.

1.1 Consideraciones normativas

La edificación de viviendas considera la acreditación de cumplimiento respecto a tres temas que afectarán el diseño de soluciones constructivas: resistencia al fuego, comportamiento térmico y acústico.

El cumplimiento de estos aspectos es de carácter obligatorio y los requisitos dependerán del tipo de elemento que se está evaluando dentro de una edificación, que puede ser estructural o no.

La plataforma online *Diseña Madera* presenta soluciones constructivas que cuentan con informes de acreditación de cumplimiento de los tres aspectos, en el caso que corresponda. Por otro lado, la plataforma de *MINVU* proporciona diversas soluciones constructivas en madera para ejecución de viviendas.

1.1.1 Requerimientos de resistencia al fuego

En Chile, la edificación de viviendas comprende el cumplimiento de requisitos de resistencia al fuego para cada uno de sus elementos constructivos, cuyas exigencias se establecen de acuerdo al número de pisos de la edificación, en los artículos 4.3.3 y 4.3.4 de la O.G.U.C. De igual manera que una edificación tradicional, las viviendas industrializadas deberán cumplir con las exigencias de resistencia al fuego.

Las exigencias aplican, según corresponda, para los siguientes elementos: muros cortafuego, muros de la caja de escaleras, muros de caja de ascensores, muros divisorios entre unidades, muros estructurales, muros no estructurales o tabiques, escaleras, entrepisos y techumbre. El

cumplimiento de los requisitos puede acreditarse mediante la especificación de soluciones constructivas presentes en el Listado oficial de comportamiento al fuego de elementos y elementos de la construcción, del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Por otro lado, la plataforma Diseña Madera presenta soluciones que acreditan el cumplimiento de diferentes exigencias, dependiendo del tipo de elemento constructivo. En el caso de que se considere utilizar una solución constructiva que no cuente con un informe de acreditación, se deberá ejecutar un ensayo de comportamiento al fuego de la solución y la elaboración de un informe que acredite que esta solución cumple con la exigencia o se podrá contar con un informe de asimilación, de acuerdo a criterios indicados en NCh3684/1:2002 Determinación de la clasificación de resistencia al fuego – Método de asimilación – Parte 1: Método de asimilación por comparación directa para soluciones constructivas en base a estructura de acero o madera y placas de revestimiento, en base a ensayos nacionales y NCh3684/2:2022 Determinación de la clasificación de resistencia al fuego - Método de asimilación - Parte 2: Método de asimilación por comparación directa para elementos de construcción en general, en base a ensayos extranjeros.

Se podrá asimilar la resistencia al fuego de una solución constructiva ya ensayada, a otra solución de características similares, en casos donde se considere capas adicionales en una o ambas caras y siempre que se verifique, que la reacción al fuego de los materiales que conforman las capas adicionales no altera la resistencia al fuego de la solución constructiva principal ensayada; lo cual deberá ser acreditado mediante un informe emitido por un profesional especialista y adjuntando a este informe la documentación respectiva de respaldo.

Los elementos que deberán contar con acreditación son:

- Muros - Paramentos – Paneles Verticales
- Pilares - Elementos Estructurales Verticales
- Puertas – Elementos Constructivos Verticales
- Losas – Elementos Estructurales Horizontales
- Escaleras - Elemento Inclinado
- Complejo Cielo -Techumbre
- Entramados de Entrepisos – Elementos Estructurales Horizontales
- Vigas – Elementos Estructurales Horizontales
- Elementos Protectores

Para cumplir con los requisitos de cada elemento se requiere la adición de capas de material que permitan retardar la propagación del fuego hacia la otra cara del elemento. Es importante privilegiar soluciones constructivas compatibles con la prefabricación, que puedan ser cortadas de acuerdo a los detalles constructivos y transportadas de forma segura, además que permitan un montaje rápido para reducir los trabajos de construcción en el sitio. En casos donde corresponda, las planchas de yeso cartón considerarán un traslape o desfase que optimice el desempeño de la solución, como se observa en la siguiente figura.

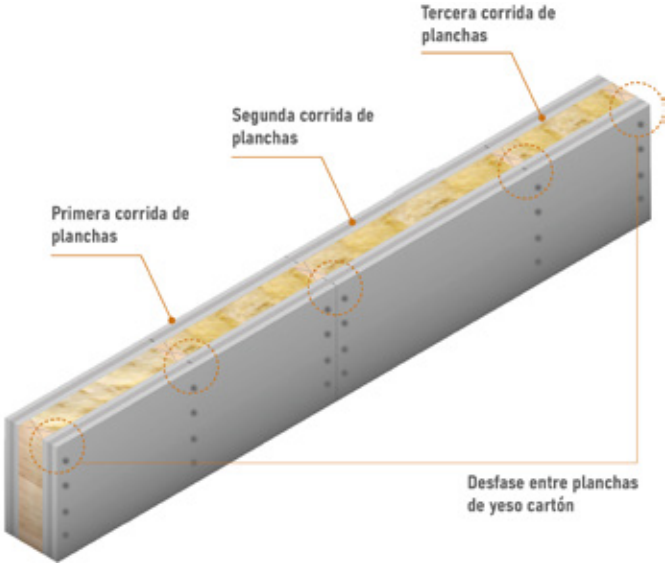


Figura 28. *Desfase de planchas*

Para muros, entrepisos y techumbres, el yeso cartón es un material ampliamente utilizado para cumplir con los requisitos de resistencia al fuego, pero su uso requiere un especial cuidado para su manipulación si se considera incorporar durante la prefabricación, debido a su fragilidad, especialmente en aristas o esquinas expuestas a golpes durante el transporte, izaje o montaje.

Figura 29. *Junta intumescente para la protección de conectores*

El diseño de soluciones debe considerar también la protección de conectores frente al fuego, en primer lugar, a través del diseño y posteriormente mediante el uso de productos como cintas, sellantes, espumas y otros materiales intumescentes que puedan colaborar en la protección de otros tipos de encuentros también, como puertas o encuentros de elementos.

Independiente del tipo de edificación y su uso, para el resguardo de estructuras de madera, es fundamental la prevención, detección temprana y protección contra el fuego. Esto es posible a través de la instalación de sistemas como detectores de calor, detectores de humo o aspersores de agua. La instalación de estos sistemas debe ser evaluada en equipo, considerando si es factible su incorporación durante la etapa de prefabricación o si se instalarán en obra.

1.1.2 Requerimientos térmicos

Debido a la diversidad de climas presentes en Chile, cada zona posee características y requerimientos diferentes y pueden variar considerablemente si se comparan los requerimientos de una vivienda en el norte con una en el sur del país. Toda vivienda industrializada deberá cumplir con exigencias definidas por el Estándar higrotérmico para viviendas industrializadas *(ver*

2.2.1 Estándar Higrotérmico para viviendas industrializadas) y las especificaciones se detallan para cada elemento que tenga una cara expuesta al exterior, con valores diferenciados para muros perimetrales, piso ventilado, techumbre y puertas opacas.

En edificaciones de entramado ligero en madera, el material utilizado como aislante térmico puede variar entre empresas industrializadoras y debe ser confirmado por el equipo de diseño para generar soluciones que cumplan con los requisitos de la zona térmica donde se va a emplazar la edificación.

El entramado ligero en madera permite la instalación de aislación térmica entre los elementos que componen la estructura y cuando los paneles se cierran a ambos lados, sólo es posible verificar los materiales durante su fabricación, por lo tanto, esta labor debe ser ejecutada procurando cubrir toda el área libre para evitar infiltraciones de aire y evitar la pérdida o ganancia de calor no proyectada en los encuentros de elementos como secciones de muro con ductos eléctricos u otros. El diseño de las soluciones constructivas debe permitir la continuidad del aislante térmico entre diferentes elementos para evitar la generación de puentes térmicos, por lo tanto, deberán evaluarse en función del desempeño y su compatibilidad con la prefabricación.

Debido a que la construcción prefabricada se realiza en entornos controlados, existe la oportunidad de realizar pruebas de hermeticidad a los paneles fabricados, que permitan garantizar su comportamiento en conjunto con soluciones a realizar en obra. Mientras que, la construcción modular presenta la oportunidad de desarrollar soluciones innovadoras que garanticen la eliminación de puentes térmicos.

Se recomienda optar por materiales que sean compatibles con los procesos y maquinarias utilizadas en la prefabricación, de manera que permitan agilizar el trabajo en la planta y se optimice el tiempo de trabajo y el material.

En proyectos que consideren la ejecución de sobrecimientos, se deberá incorporar aislación térmica, con un material que cumpla con los requisitos de resistencia térmica R100 exigidos por el estándar higrotérmico para viviendas industrializadas. Este material deberá ser instalado por el exterior, cubriendo el sobrecimiento desde el nivel de piso terminado hasta el hombro de la fundación o 30cm bajo el nivel del terreno.

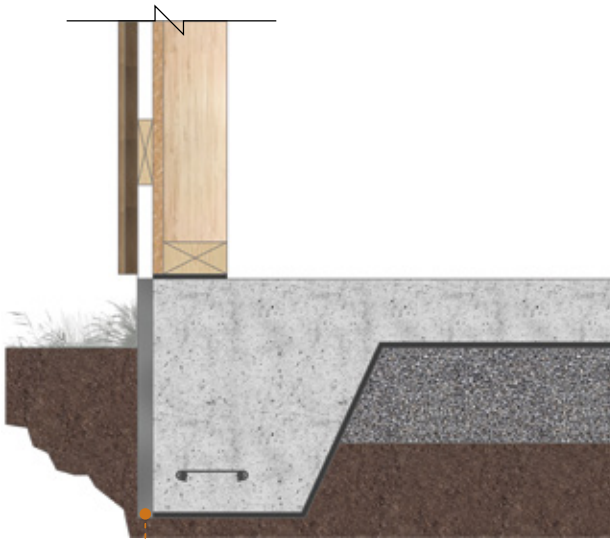


Figura 30. *Aislación de sobrecimiento*

Si la sustentabilidad es uno de los objetivos que persigue el proyecto, para la aislación térmica se debe tomar en cuenta el origen de los materiales a utilizar, privilegiando el uso de aislantes térmicos sustentables.

El diseño de las soluciones y la instalación de los materiales debe buscar minimizar los puentes térmicos en cada una de las soluciones de piso, muros o techumbre, para mejorar el comportamiento de la edificación y así reducir la demanda energética de climatización. El proceso de diseño debe tomar las consideraciones para asegurar el buen desempeño del aislante térmico, con materiales de las dimensiones correctas para cubrir la superficie, ya sea en elementos horizontales o verticales. La prefabricadora será la responsable de ejecutar la instalación y se de-

berá tomar las consideraciones para que los elementos lleguen en perfectas condiciones al sitio.

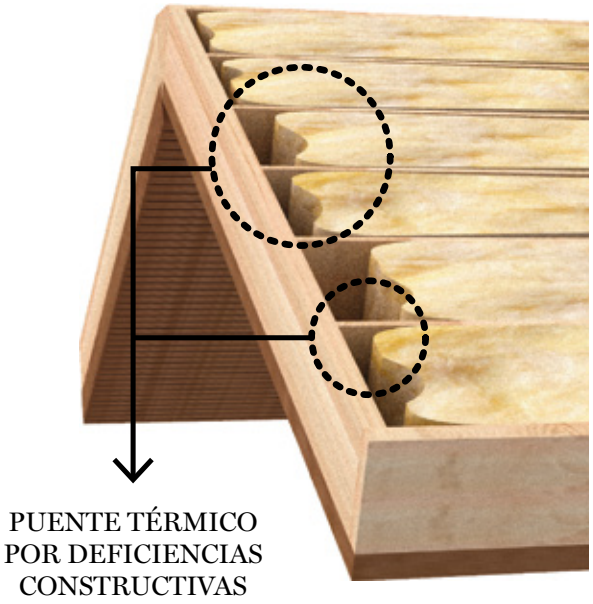


Figura 31. *Errores en la instalación del aislante térmico*

A nivel nacional, la ejecución de viviendas industrializadas tipo implica la aplicación del estándar higrotérmico para viviendas industrializadas tipo, que regula los valores de transmitancia máximos que pueden tener las soluciones constructivas que componen la vivienda y también de puertas.

1.1.3 Requerimientos acústicos

Al igual que en una construcción tradicional, toda construcción industrializada emplazada en Chile debe cumplir con los requerimientos acústicos de la O.G.U.C., que en el caso de viviendas van a depender de sus características y tipología. Edificaciones de vivienda colectiva, vivienda continua, viviendas pareadas y unidades de vivienda que estén contiguas a recintos no habitables deberán cumplir con exigencias acústicas.

El Manual de aplicación a la Reglamentación acústica de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones presenta recomendaciones para aquellos elementos no considerados en la O.G.U.C., como ventanas o ascensores. Se destaca el alto estándar de las viviendas industrializadas tipo.

En viviendas industrializadas, las soluciones de conexión entre elementos prefabricados son fundamental para lograr una efectiva aislación acústica que permita bloquear la transmisión de ruido entre recintos. El diseño debe asegurar que las juntas entre elementos prefabricados (por ejemplo, entre panel de entrepiso y panel de muro divisorio) estén selladas para evitar fugas de sonido, a través del uso de materiales de sellado acústico en todos los encuentros. Actualmente existen diversos productos en el mercado que permiten reducir la transmisión de ruido por vía aérea y estructural. Los encuentros de módulos o paneles de entramado ligero y/o CLT pueden considerar este tipo de soluciones si se busca generar un estándar adecuado de aislación acústica entre recintos o entre viviendas.

Figura 32. *Solución con membranas acústicas en encuentro de paneles de muro y entrepiso*

1.2
Consideraciones de funcionamiento y desempeño

El diseño de proyectos industrializados implica la evaluación y resolución de aspectos que propician el buen funcionamiento y desempeño de la edificación. A continuación, se presentan los aspectos más relevantes a considerar para asegurar el buen funcionamiento de una edificación industrializada, desde el diseño de diferentes áreas del proyecto.

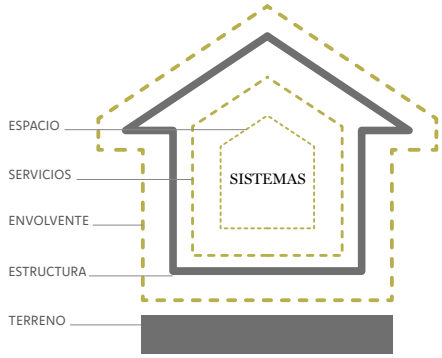


Figura 33. *Instalaciones incorporadas en las fundaciones*

1.2.1 Diseño estructural

De igual manera que edificaciones construidas de manera tradicional, las industrializadas deben cumplir con todos los requerimientos estructurales exigidos normativamente.

El diseño estructural debe considerar las cargas propias de una obra tradicional, pero además debe contemplar las cargas ejercidas en los elementos durante el transporte, para garantizar su integridad durante el traslado. Las condiciones del camino pueden ser relevantes para el diseño, debido a que las cargas ejercidas en los elementos son diferentes en un camino asfaltado que en un camino rural o en caminos con grandes pendientes.

1.2.1.1 Fundaciones

Dentro de las etapas del proceso constructivo descritas en la Parte I, la ejecución de fundaciones se realiza de manera simultánea con la prefabricación de elementos, por lo tanto, sus plazos deben estar coordinados para que el día de entrega de elementos prefabricados, se pueda comenzar a realizar su montaje en el sitio. Fundaciones bien ejecutadas facilitan el desarrollo del montaje y reducen la necesidad de intervenir elementos en el sitio, por lo tanto, optimizan el tiempo y los recursos.

La ejecución de fundaciones debe realizarse con el cuidado de posicionar todos los ductos de especialidades correctamente para permitir su continuidad hacia los paneles de muro, además de la instalación de todos los elementos de conexión, membranas, cintas y elementos necesarios para la ejecución de fundaciones.

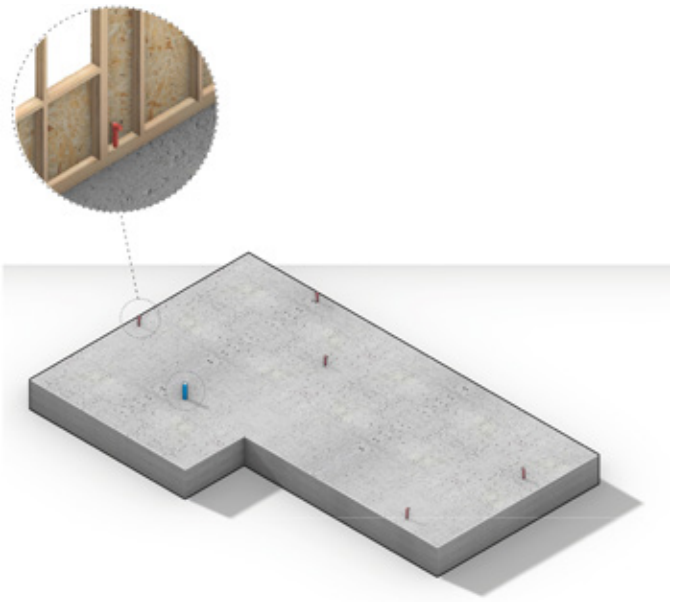


Figura 34. *Instalaciones incorporadas en las fundaciones*

Las tolerancias establecidas deben permitir resolver imprecisiones menores que no impliquen rehacer trabajos o poner en riesgo la estabilidad estructural de cada elemento o la obra por hacer más cortes o perforaciones que las planificadas o realizarlas en zonas críticas estructuralmente.

El diseño de fundaciones debe considerar los aspectos constructivos del montaje que puedan ser relevantes, como cambios en la geometría para permitir un montaje preciso o más rápido, conexiones especiales o cualquier otro aspecto relevante.

La nivelación de las fundaciones y radier es muy importante en una obra que contiene elementos prefabricados, debido a que los desniveles o hundimientos podrían acumularse y generar descuadres importantes y la imposibilidad de ajustar correctamente los últimos elementos en montar. Esto podría dañar los elementos y reducir su vida útil, lo que resulta en costos adicionales de reparación o reemplazo durante la obra o durante la operación del edificio.

Para una correcta ejecución de fundaciones será fundamental la planta de fundaciones, con las especificaciones constructivas de todos los elementos que deban ser considerados en la etapa previa al montaje, tales como:

- Instalaciones eléctricas
- Instalaciones de agua potable
- Instalaciones de alcantarillado
- Instalaciones de climatización
- Conectores
- Aislación térmica de sobrecimientos
- Membranas o cintas acústicas
- Cintas o sellos para evitar infiltraciones de aire
- Soleras de montaje (entramado ligero)
- Otros elementos o trabajos necesarios para el montaje de elementos

La precisión en el cumplimiento de las indicaciones de la planimetría es fundamental para favorecer el proceso de montaje y evitar retrasos por correcciones o ajustes.

Usualmente la ejecución de fundaciones la realiza la empresa constructora, que puede estar a cargo también del montaje de la obra pero que es independiente de la empresa industrializadora, por lo tanto, debe existir coordinación entre estos dos actores para desarrollar las obras en los plazos estimados por el coordinador del proyecto.

La digitalización del proyecto entrega herramientas para la planificación y comunicación entre los actores involucrados en el traspaso de trabajos desde la prefabricación a trabajos en el sitio.

1.2.1.2 Conexiones

Las conexiones entre elementos prefabricados deben ser diseñadas para un rápido montaje en el sitio y poder aprovechar las ventajas en términos de rapidez de usar elementos prefabricados. Los detalles de conexiones van a variar, dependiendo del sistema constructivo y los elementos a conectar, tanto entre paneles como entre módulos, entre elementos prefabricados y fundaciones y otros encuentros. En todos los casos es importante buscar la estandarización de soluciones y procesos constructivos, para facilitar la ejecución del montaje y obras en el sitio, considerando la calificación de la cuadrilla que ejecutará las conexiones.

Este aspecto puede sumar un nivel de complejidad a la ingeniería de detalles, en casos donde se utilicen paneles cerrados por ambas caras y deban desarrollarse nuevos sistemas de fijaciones o utilizar los disponibles en el mercado, que pueden tener un costo más elevado que los utilizados comúnmente.

Por otro lado, además de las cargas propias de una obra, es importante considerar las cargas ejercidas al momento del traslado e izaje de elementos durante el montaje, especialmente cuando el elemento posee diversas capas y materiales diferentes, que pueden aportar cargas importantes o un nivel de complejidad mayor a la ejecución de las etapas de transporte y montaje.

Las conexiones pueden ser un ítem significativo en los costos de un edificio, por lo tanto, es importante evaluar alternativas innovadoras que permitan una reducción en la cantidad de conectores o aquellas que permitan optimizar el tiempo de montaje.

La elección de sistema prefabricado a utilizar y el grado de industrialización de los elementos son variables que influyen en la definición de las conexiones. Mientras en un proyecto que considera paneles abiertos, las conexiones son tradicionales, en un panel cerrado puede ser un desafío constructivo y económico el diseño de conexiones.

Figura 35. *Tipos de conexiones a definir en una edificación panelizada*

La disponibilidad de proveedores de conectores es otra variable a considerar, en especial en sectores rurales o de difícil acceso, así como la disponibilidad de conectores que requieran una compra que implique mayores plazos. En casos como este, la coordinación entre equipos es fundamental para disponer de los materiales necesarios en la fecha estipulada para el montaje.

1.2.2 Diseño de instalaciones

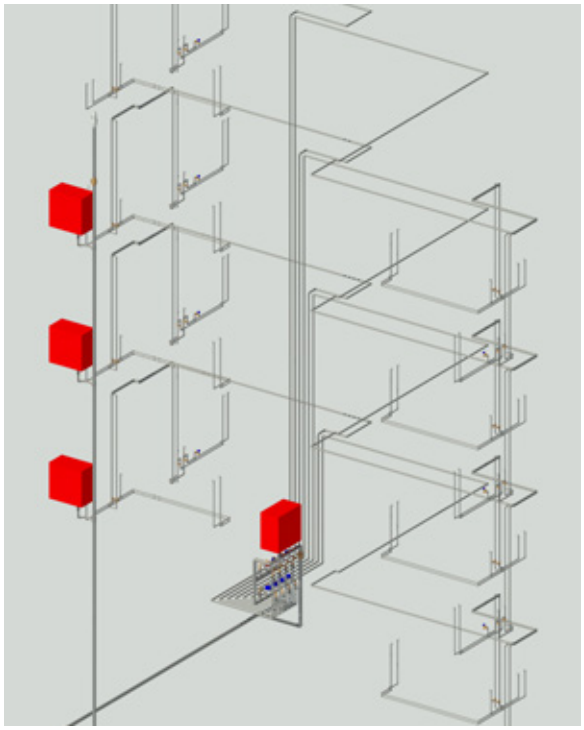


Figura 36. *Diseño y coordinación de instalaciones*

De igual manera que en la construcción tradicional, las edificaciones industrializadas deben cumplir con las legislaciones vigentes, normas y estándares aplicables según corresponda a cada especialidad. Tanto edificaciones panelizadas como módulos o pods deben especificar de qué manera dan cumplimiento a los requerimientos correspondientes, a través de la documentación y planimetría necesaria. Cada proyecto debe considerar procedimientos de control de calidad a lo largo del proceso, que validen la ejecución de instalaciones dentro de elementos y la calidad de cada una de sus partes.

Para el transporte de elementos, debe considerarse la protección de los ductos, cajas y todo elemento que quede expuesto a vibraciones o movimientos que puedan afectar la calidad de la instalación. Por otro lado, si quedan elementos expuestos, es importante protegerlos de la radiación solar. El diseño de los elementos debe considerar medidas que ayuden a mitigar los efectos de las cargas a las que estarán sometidas en el izaje, transporte y montaje, por lo tanto, el diseño debe anticipar el comportamiento de paneles o módulos.

El flujo de trabajo debe considerar la participación temprana de especialistas en el diseño de la edificación, debido a que es necesario evaluar la factibilidad de las soluciones constructivas proyectadas, en función de las capacidades de la empresa industrializadora, tanto si las instalaciones se ejecutarán en la fábrica como en la obra.

En proyectos industrializados, todo proyecto de instalaciones debe ser desarrollado en la etapa de diseño, en coordinación con el resto de especialidades, con el objetivo de incorporar el proyecto, si corresponde, en los planos de fabricación que utilizará la empresa industrializadora para fabricar los elementos. En casos donde las instalaciones sean incorporadas en la prefabricación, es importante ajustar la fabricación a las especificaciones descritas en los planos, para así poder realizar las conexiones correctamente en el sitio y evitar añadir trabajos de corrección de errores.

En módulos o paneles de madera, la perforación de la estructura para la canalización de ductos debe considerar la manera en que esto podría afectar la resistencia estructural de los elementos y generar soluciones para mitigar los efectos. De igual manera, corresponde evaluar los efectos de las perforaciones en el comportamiento de las soluciones ante incendios, para evaluar decisiones de diseño que permitan sellar y asegurar el correcto comportamiento al fuego de las soluciones y evitar la propagación de fuego o humo a través de ellas. En tercer lugar, el diseño de las perforaciones de la estructura o de materiales de la envolvente debe considerar el uso de sellos que permitan aumentar la hermeticidad de la envolvente en cada una de sus caras, tanto en muros, techumbre o piso. Para este propósito existen diversos productos en la industria que permiten sellar las aberturas, tales como cintas, láminas, espumas o sellantes.

La fabricación de elementos industrializados debe considerar las tolerancias necesarias para

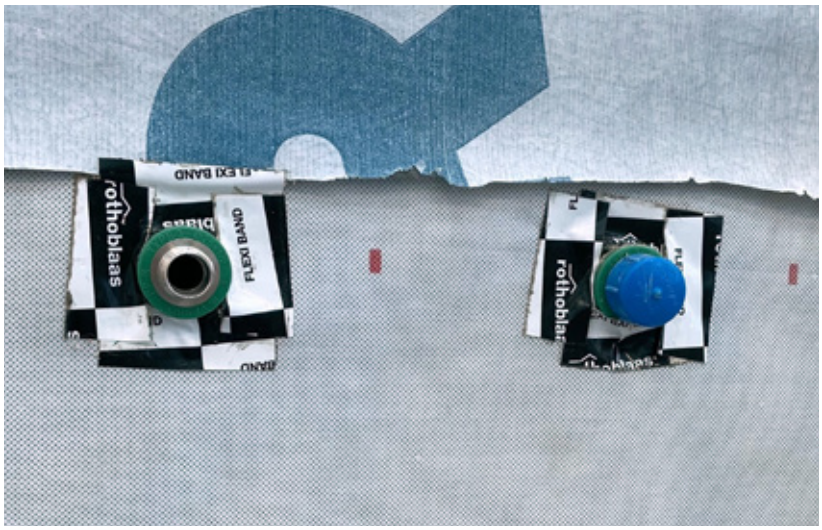


Figura 37. *Sellos para perforaciones de la envolvente*

llevar a cabo las instalaciones correctamente, sin afectar las propiedades estructurales del elemento. Las verificaciones estructurales deben realizarse considerando las tolerancias para la ejecución de todas las instalaciones y especialmente para permitir las conexiones entre elementos y así asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

En la medida en que más procesos son incorporados a la fabricación en planta, es posible tener un mayor control de la producción y del cumplimiento de las especificaciones. En el caso de pods o módulos, existe la oportunidad de solucionar múltiples encuentros y minimizar la cantidad de conexiones en obra con otros elementos, por lo tanto, se reduce la incertidumbre en este aspecto.

Dependiendo del nivel de prefabricación que es posible alcanzar, es necesario evaluar la manera en que se incorporarán las instalaciones en los elementos. Si su incorporación se realiza durante la fabricación en planta, la empresa industrializadora debe contar con los medios para asegurar el cumplimiento de las especificaciones de los planos de fabricación y garantizar la calidad de la producción. Si la ejecución de instalaciones se realiza en obra, el nivel de prefabricación es menor y aumentan las variables que podrían afectar la certidumbre del resultado.

Para ejecución de instalaciones en obra, existen dos alternativas. En primer lugar, existe la posibilidad de complementar el trabajo en planta con el trabajo en el sitio. Un ejemplo de esta estrategia es realizar los cortes de madera en planta y dejar las perforaciones necesarias para instalar los ductos en el sitio y completar las obras. Por otro lado, existe la posibilidad de ejecutar el total de los trabajos en obra, lo que implica coordinar su ejecución con la empresa constructora. En ambos casos, es relevante que los responsables de su ejecución tengan conocimiento de las implicancias de un proyecto industrializado para evitar realizar acciones que afecten el comportamiento de los elementos.

Los contratos de trabajo entre colaboradores deben especificar el alcance de las responsabilidades de cada uno, definiendo las labores a realizar por la empresa industrializadora, montajistas y la constructora a cargo de trabajos en el sitio. El traspaso de trabajo debe realizarse con el mayor detallamiento posible, con la especificación precisa de los elementos prefabricados y los elementos que contiene. El diseño de las conexiones entre paneles o módulos debe ser conocido por todos los involucrados en el proceso, con el objetivo de facilitar las obras y deben contar con la aprobación del especialista respectivo.

1.2.2.1 Eléctricas

Al igual que en una construcción tradicional, en la construcción industrializada toda instalación eléctrica debe cumplir con la legislación, normativas y estándares chilenos para asegurar su calidad y buen funcionamiento, en coordinación con otras especialidades. Se debe dar cumplimiento al Decreto N°8, Reglamento de seguridad de las instalaciones de consumo de energía eléctrica, 2021.

En proyectos donde el nivel de prefabricación de elementos considere la incorporación de ductos eléctricos en planta, se requiere la incorporación temprana de especialistas, que puedan alimentar el diseño con su visión y darle factibilidad al proyecto para avanzar de manera segura hacia etapas posteriores. Las alternativas de diseño guardan relación directamente con las capacidades y tecnología de la planta, por lo tanto, es necesario conocerlas para el desarrollo de propuestas.

Debido a la complejidad que puede significar la conexión de ductos, debe establecerse una estrategia de canalización, que puede realizarse por el radier, sobre el cielo falso, dentro del entrama-

do de muros, bajo revestimiento de muros, por bandejas sobre la superficie, entre otras alternativas. El diseño de canalizaciones debe realizarse en coordinación con otras especialidades que también deban ser canalizadas y puedan implicar un cruce de ductos o elementos.

La definición de la estrategia debe evaluarse considerando:

- Tiempo de ejecución proyectado (hay estrategias más rápidas de montar que otras)
- Maquinaria y tecnología disponible
- Calificación de la mano de obra que ejecuta el proyecto
- Aspectos constructivos como el nivel de prefabricación (por ejemplo, si son paneles abiertos o cerrados por ambas caras).

Estas variables pueden influir fuertemente en el tiempo de trabajo en obra e incluso en el tiempo de montaje (que podría extenderse si los elementos presentan errores en su fabricación y requieren reparaciones o si el método de conexión de elementos no fue bien diseñado).

Antes de comenzar la prefabricación de elementos, es importante establecer un acuerdo entre los diferentes profesionales que participen, para definir y congelar el diseño del proyecto. Entre otros aspectos, debe estar definido el proyecto eléctrico, considerando el trazado de la canalización, materialidades y especificaciones, en un documento consensuado entre las partes, que permita avanzar hacia la etapa de prefabricación. El equipo de profesionales tiene la responsabilidad de definir el método de conexión entre ductos de diferentes elementos y asegurar el funcionamiento seguro de las instalaciones, con los correspondientes detalles de montaje. La detección de interferencias con la estructura u otras instalaciones debe hacerse tempranamente, tanto si las canalizaciones se hacen en planta como si se ejecutan en el sitio.

Cuando las instalaciones se incorporen en la etapa de prefabricación, todas las especificaciones deberán estar contenidas en los planos de fabricación, considerando distanciamientos, dimensiones de las cajas eléctricas y artefactos que impliquen cortes, detalles de sellos o materiales para la hermeticidad y todos los antecedentes necesarios para ejecutar la fabricación de elementos en la planta.

Las tolerancias para el paso de ductos deben ser definidas con anterioridad y el diseño debe considerar sellos para evitar puentes térmicos en estas zonas o infiltraciones de aire o agua.

Posterior a la instalación de ductos y artefactos dentro de un elemento (panel o módulo), es pertinente realizar una verificación y control de calidad a las instalaciones, tanto antes de salir de la planta, como al llegar al sitio y posterior al montaje. De esta manera, es posible asegurar que los elementos se fabricaron de acuerdo a las especificaciones, se mantuvieron sus propiedades y se cumplen las condiciones para un buen funcionamiento del sistema.

1.2.2.2 Sanitarias – Aguas lluvia - Reciclaje de agua

De igual manera que una construcción tradicional, todas las instalaciones sanitarias en edificaciones industrializadas deben cumplir con el Reglamento de Instalaciones Domiciliarias de Agua Potable y Alcantarillado (RIDDA), legislaciones, normativa y estándares aplicables a cualquier edificación en el territorio nacional. Por otro lado, es importante que el diseño considere las etapas de transporte y montaje, para

que las instalaciones no vean afectada su calidad y funcionamiento por las cargas o vibraciones del proceso de transporte o por el proceso de izaje.

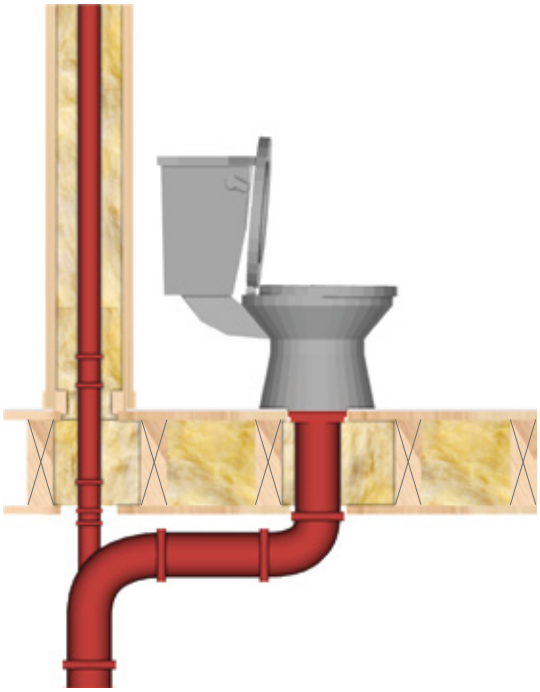


Figura 38. *Instalación de ductos sanitarios en elementos prefabricados*

El especialista encargado del desarrollo de proyectos de agua potable y alcantarillado debe conocer las características y especificaciones de los elementos prefabricados, para generar un proyecto optimizado y ajustado a las particularidades constructivas y alcances de la industrialización. Además, es importante que todos los profesionales que participan del proyecto tengan conocimiento del proyecto, para definir en conjunto las estrategias de canalización y evitar interferencias entre especialidades.

Dependiendo de la etapa de incorporación de ductos en los elementos, se va a definir su nivel de prefabricación. La incorporación en planta implica un mayor nivel de prefabricación, lo que implica una definición temprana del tipo de solución a utilizar para conectar las instalaciones en el sitio.

Debido a las dimensiones de algunos ductos sanitarios, el desarrollo del proyecto debe estar en coordinación con la arquitectura e ingeniería estructural del proyecto, para definir una estrategia de canalización que no afecte la resistencia estructural de paneles o módulos debido a la ejecución de perforaciones en la estructura.

En edificios, el diseño de las instalaciones sanitarias debe optimizarse y ser eficiente para facilitar el proceso de montaje y conexiones entre elementos en el sitio, para así asegurar su funcionamiento. La concentración de recintos húmedos en planta, permitiría optimizar los recorridos de las canalizaciones de agua e incluso reducir la cantidad de shfts que requiera el proyecto.

1.2.2.3 Gas

Para proyectos que consideren la ejecución de un proyecto de gas, se deberá dar cumplimiento a las normativas y regulaciones vinculadas con las instalaciones de gas en viviendas, considerando estándares y reglamentos de seguridad. Se deberá cumplir con lo definido por el Decreto Supremo N° 66 “Reglamento de Instalaciones interiores y Medidores de gas”, como cálculos de abastecimiento de gas licuado, diámetros de tuberías, ventilación y volúmenes de recintos, tipo de evacuación de gases quemados y tipo de artefactos. Además de lo definido por la Resolución Exenta N°489, “Procedimiento de Inspección de Instalaciones De Gas” y exigencias de la Superintendencia de electricidad y combustibles (SEC) para evitar interferencias con ductos e instalaciones de otras especialidades.

1.2.2.4 Climatización

El diseño de viviendas debe considerar dentro de sus criterios y objetivos, brindar un ambiente interior sano y confortable para sus habitantes, la protección contra el frío, la humedad, el calor, la lluvia, el viento, entre otros y garantizar condiciones de habitabilidad al interior. Las estrategias utilizadas para lograr este objetivo pueden ser variadas y van a depender de la zona en la que se emplaza la vivienda, el clima y las características del entorno inmediato.

En algunos casos, será necesario complementar el diseño de envolvente y el uso de estrategias pasivas de control ambiental con el uso de sistemas de climatización para la vivienda, tanto de enfriamiento como calefacción y en ambos casos el proyecto se ve beneficiado de la incorporación temprana de estas variables en el diseño del proyecto. Esta decisión permite definir las interacciones entre sistemas y evaluar alternativas costo eficientes para asegurar la durabilidad y el funcionamiento de las soluciones, junto con su correcta incorporación a sistemas industrializados.

La incorporación del especialista de climatización debe realizarse desde el inicio del proceso, para definir la factibilidad de los sistemas de climatización y su idoneidad en el contexto de la industrialización, especialmente en edificaciones panelizadas donde existe mayor complejidad respecto a la continuidad de elementos.

El emplazamiento de viviendas en zonas frías de Chile puede implicar el uso de sistemas de calefacción que consideren ductos de diámetros mayores a otras especialidades y es posible optimizar la integración del sistema con la estructura y un mejor comportamiento a través de una incorporación temprana de estas variables en el diseño. En algunos casos, la capacidad de la empresa industrializadora permitirá la ejecución de perforaciones e incluso la instalación de estos ductos en paneles o módulos, lo que incrementaría el nivel de prefabricación de elementos y podría significar mejoras en la hermeticidad de la solución.

La climatización de una vivienda puede resolverse de diversas formas y esta evaluación debe realizarse en la etapa de diseño, considerando el uso de aire acondicionado, recuperadores de calor, intercambiadores de calor u otros tipos de sistemas.

Debido a cambios de temperatura, podría existir cambios dimensionales en algunos materiales, por lo tanto, sería beneficioso optar por soluciones flexibles que absorban estos cambios y eviten el choque y daño de elementos.

En el caso de módulos, la instalación de sistemas de climatización debe estar asegurada por la empresa industrializadora, quienes se encargan de su instalación en la planta de prefabricación, mientras que la empresa constructora es la responsable de la conexión entre módulos y debe asegurar el correcto funcionamiento del sistema. Ambas responsabilidades deben estar definidas desde el inicio del proceso a través de especificaciones en los contratos. Por otro lado, el diseño de las instalaciones debe incluir medidas de protección durante el transporte para evitar daños que afecten el funcionamiento del sistema.

La instalación de ductos en todo momento debe considerar medidas para asegurar la hermeticidad de la vivienda y evitar puentes térmicos en esos tramos, debido a que podría afectar el desempeño térmico de la vivienda.

1.2.2.5 Paneles fotovoltaicos y colectores solares

La consideración de paneles fotovoltaicos o colectores solares requiere la coordinación con diversas especialidades para optimizar el diseño y permitir una inclusión exitosa en la prefabricación y la ejecución del proyecto.

El peso de los equipos debe ser considerado en el cálculo estructural de la edificación, especialmente cuando se proyecta una alta cobertura de la demanda energética y se debe instalar una cantidad de paneles correspondiente a un peso considerable para la estructura de la vivienda. En estos casos es importante también diseñar las soluciones estructurales para fijar la estructura de los paneles a la cubierta, con el objetivo de no realizar intervenciones posteriores.

Si se considera la inclusión de estos sistemas deben existir registros para realizar la mantención de equipos a fututro.

Debido al alto nivel de detalle que se puede lograr con software de coordinación, resultaría beneficioso incorporar ductos de instalaciones que se tenga contemplado instalar en el futuro, como paneles fotovoltaicos o colectores solares.

1.2.2.6 Sistemas de detección de humo

Desde el diseño es posible generar propuestas que propicien la durabilidad de edificaciones para extender su vida útil, considerando entre otros aspectos, la prevención, detección y protección contra el fuego.

De acuerdo a las características de la edificación, se deben evaluar diferentes estrategias para cumplir con la normativa de protección contra el fuego. En el caso de edificios puede ser beneficioso contar con sistemas de detección temprana de incendios, como detectores de humo que permitan poner en funcionamiento los protocolos correspondientes para la protección de la edificación.

La detección de incendios en etapas iniciales entrega la posibilidad de tomar de medidas preventivas y la evacuación oportuna de ocupantes y se puede realizar a través de la instalación de detectores de humo que emiten una alerta. El uso de sistemas de detección de humo debe ser considerado en etapas iniciales para su coordinación con otras especialidades y su correcta inclusión en la prefabricación si existe esa factibilidad.

1.2.3 Diseño de envolvente

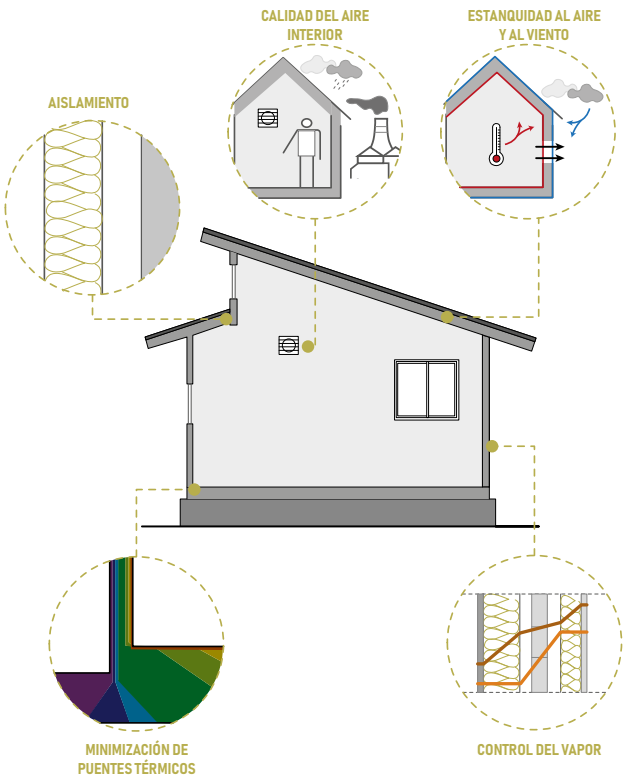


Figura 39. Funciones de la envolvente de una edificación

La envolvente de una edificación corresponde a su capa exterior y está compuesta por todos los elementos que permiten mediar entre el espacio interior y el exterior de la edificación. La principal función de la envolvente es la protección

respecto a condiciones exteriores como la temperatura, humedad, vientos o asoleamiento, entre otras.

El diseño de envolvente de una edificación industrializada es crucial debido a su impacto en la eficiencia energética, el confort térmico, la aislación acústica, la durabilidad y resistencia de una vivienda, la sustentabilidad y la percepción visual de la edificación.

Entre otros factores, la morfología de una edificación es uno de los aspectos que permite definir las características de su envolvente, que dependiendo del diseño puede estar compuesta por piso ventilado, muros perimetrales, ventanas, puertas y techumbre. Las soluciones constructivas a utilizar tienen directa vinculación con la empresa industrializadora y sus capacidades, que van a definir los alcances de la prefabricación.

Es importante considerar en el diseño arquitectónico el uso de estrategias pasivas de control ambiental, que orienten las decisiones de diseño para favorecer el desempeño térmico de la edificación aprovechando las condiciones del entorno y minimizando el gasto energético. Las decisiones vinculadas a favorecer las condiciones de iluminación natural, ventilación, infiltraciones de aire y confort térmico deben ser consideradas tempranamente en el proceso de diseño, para posteriormente evaluar la complementación con artefactos de acondicionamiento térmico.

Un aspecto diferenciador entre edificaciones panelizadas respecto a edificaciones construidas tradicionalmente es la cantidad de partes que conforman la envolvente y que requieren la implementación de estrategias para generar continuidad y evitar puentes térmicos u otros problemas que afecten su desempeño.

Con el paso de los años, la envolvente podría disminuir su desempeño y deben generarse indicaciones para favorecer la durabilidad de la edificación. La protección por diseño debe ser la primera herramienta para enfrentar el cuidado de madera de uso estructural, como protección frente a riesgos asociados a la lluvia, humedad, asoleamiento entre otros. Por otro lado, junto con la impregnación, es importante a través del diseño proteger la madera frente al riesgo de humedad, que podría propiciar el ataque de termitas.

De acuerdo al sitio de emplazamiento, se establecerán los requerimientos higrotérmicos de la edificación y las soluciones constructivas a utilizar, en conjunto con un análisis de las posibilidades que entrega la prefabricación y del proceso constructivo completo.

En el proceso de diseño, junto con la decisión de soluciones constructivas a utilizar, definir la orientación es esencial para favorecer las condiciones de una vivienda, por los efectos que genera el sol en la exposición a la luz natural y el calor. La orientación adecuada podría favorecer la iluminación natural de recintos interiores y entregar calor en invierno, condiciones que pueden mejorar la eficiencia energética de la vivienda si se diseñan cuidadosamente las aberturas de cada parte de la envolvente.

La morfología e implementación de estrategias de ventilación natural también favorecen al confort interior de la vivienda y deben ser pensadas en función del emplazamiento de la edificación.

La morfología y características constructivas de la vivienda deben estar en equilibrio con las decisiones asociadas a la prefabricación, sin perder el valor arquitectónico del diseño debido a criterios de estandarización, logística o montaje.

1.2.3.1 Humedad y condensación: Membranas de vapor y humedad

Al igual que con otros elementos de la envolvente, los encuentros de paneles deben permitir la continuidad de las membranas de vapor y de

humedad, para asegurar el buen desempeño de la envolvente y la integridad de la estructura.

La barrera de vapor no podrá ser 100% impermeable al paso de vapor, y debe ser instalada bajo el revestimiento interior o sobre éste de manera continua para evitar el riesgo de condensación intersticial. En caso de usar pinturas como barrera de vapor, solo podrán aplicarse sobre el revestimiento interior.

La barrera de humedad debe ser instalada bajo el revestimiento exterior y debe ser continua e impermeable a la lluvia, pero debe permitir que el vapor de agua pueda salir al exterior. En el caso de que el diseño no considere revestimiento exterior, es importante asegurar la impermeabilidad al agua para proteger la estructura.

El estándar higrotérmico para viviendas industrializadas tipo requiere acreditar que no existe riesgo de condensación superficial e intersticial a menos de 76% de humedad relativa del ambiente interior, donde el diseño de la solución constructiva debe permitir la salida del vapor de agua que ingrese, como se detalla en el ítem 2.2.1.

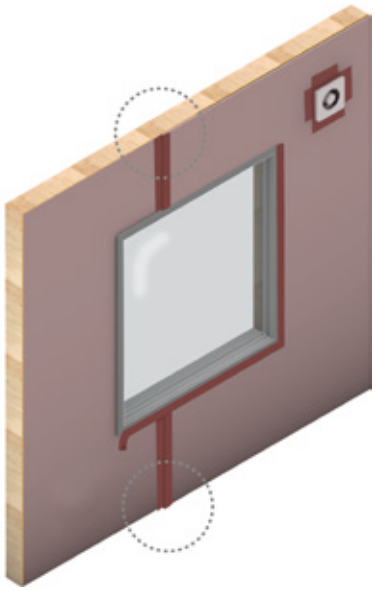


Figura 40. *Soluciones constructivas para generar continuidad entre membranas*

La discontinuidad de membranas podría generar condensación y la infiltración de humedad en la estructura de los elementos, generando daños estructurales como pudrición de la madera, moho o la degradación de materiales, por lo tanto, dar continuidad a la envolvente es un aspecto importante para asegurar la durabilidad de los elementos y prolongar la vida útil de una edificación.

A través del diseño es posible proteger la estructura, mediante sistemas pasivos que permitan la renovación de aire mínima para eliminar el vapor generado al interior de la vivienda. Para asegurar la renovación de aire necesaria debe diseñarse un sistema de acuerdo a cálculos.

1.2.3.2 Calidad del aire y ventilación

El diseño de una vivienda debe asegurar el cumplimiento de estándares mínimos de habitabilidad para permitir el desarrollo sano de actividades al interior y la ventilación es un factor relevante tanto porque colabora en el control de la calidad del aire y en el confort térmico interior.

Todas las viviendas industrializadas deberán cumplir con los caudales mínimos de ventilación descritos en el Estándar higrotérmico para viviendas industrializadas y siempre deben ser diseñadas para cubrir los requerimientos de cada recinto, de acuerdo a las actividades que ahí se desarrollan. Por otro lado, es importante que la ventilación sea controlada para lograr las renovaciones de aire necesarias para el confort interior.

Es necesario hacer énfasis en que la ventilación siempre debe ser controlada y no debe ser confundida con las infiltraciones de aire generadas por problemas constructivos

La industrialización implica la consideración de sistemas pasivos y sistemas mecánicos de ventilación desde la fase de diseño, procurando

siempre solucionar tempranamente aspectos propios de la construcción con elementos prefabricados.

Asegurar la conservación de las propiedades estructurales de los elementos prefabricados depende en parte del diseño de una estrategia de ventilación que permita asegurar los caudales mínimos indicados en las NCh 3308 y NCh 3309 para evitar los efectos negativos de la humedad y la condensación.

Para viviendas, la acreditación de cumplimiento de la exigencia de ventilación puede realizarse mediante el uso de la ficha "V1, Solución sistema de ventilación continua tipo mixta extracción mecánica e inyección pasiva" del MINVU. Esta solución se compone por tres procesos: admisión de aire, paso de aire y extracción de aire. La admisión de aire depende del caudal de renovación de aire calculado para cada recinto.

A través de la implementación de esta estrategia se asegura la renovación de aire controlada

Figura 41. *Solución sistema de ventilación continua tipo mixta MINVU*

Figura 42. *Inclusión de artefactos de ventilación mecánica en paneles prefabricados*

para el desarrollo de actividades en un ambiente sano al interior de la vivienda sin sobreventilar, lo que sería perjudicial en temporadas frías.

La incorporación de artefactos de ventilación en elementos prefabricados debe ser considerada desde la fase de diseño, debido a que puede implicar modificaciones en la estructura e intervenciones para la instalación de artefactos y es necesario evaluar la etapa en la cual se realizan las instalaciones y los responsables de esa tarea. Todos los detalles constructivos asociados al uso de sistemas de extracción mecánica deben ser considerados en la etapa de coordinación con otros especialistas, para eliminar interferencias entre sistemas. La instalación de extractores de aire en paneles de muro durante la prefabricación implica la evaluación de factibilidad de acuerdo a la composición de la estructura y, su posterior incorporación en los planos de fabricación, para que la ejecución se realice de acuerdo a lo estipulado.

1.2.3.3 Hermeticidad

Según el Manual de hermeticidad al aire de edificaciones, las infiltraciones de aire corresponden al "paso de aire sin control a través de grietas ocultas y aberturas no previstas en la

envolvente"[33],donde la hermeticidad es la capacidad de las edificaciones para controlar las infiltraciones y se mide en renovaciones de aire por hora. La Reglamentación de hermeticidad e infiltraciones en las viviendas utiliza el concepto "clase de infiltración de aire" para determinar el cumplimiento de estándares de renovación de aire.

Toda vivienda industrializada deberá cumplir con los requisitos establecidos en el Estándar higrotérmico para viviendas industrializadas, del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

El estándar higrotérmico para viviendas industrializadas define la clase de infiltración de aire máxima para la envolvente térmica (excluyendo puertas y ventanas) y es definida en función de la ubicación de la vivienda. La acreditación de cumplimiento se puede realizar tanto con un informe de ensayo en terreno, realizado de acuerdo al procedimiento indicado en la NCh3295 o mediante la especificación de una solución constructiva determinada en la partida de sellos en las especificaciones técnicas, considerando diferentes encuentros descritos en el estándar. En relación a puertas y ventanas, se exigirá un cumplimiento mínimo de clase de permeabilidad al aire, definido según zona térmica y se acreditará mediante informe de ensayo o la a utilización de alguna de las soluciones inscritas en el Listado oficial de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico, elaborado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

Para dar cumplimiento a las exigencias y asegurar la reducción de infiltraciones de aire, el diseño deberá especificar en los detalles constructivos las soluciones para cada encuentro crítico de elementos, que posteriormente deberá ejecutar la empresa constructora. Por este motivo, es importante la coordinación entre colaboradores del proceso y la correcta ejecución de soluciones especificadas por el equipo de diseño, tanto la empresa encargada de la prefabricación como la empresa constructora encargada de los trabajos en el sitio.

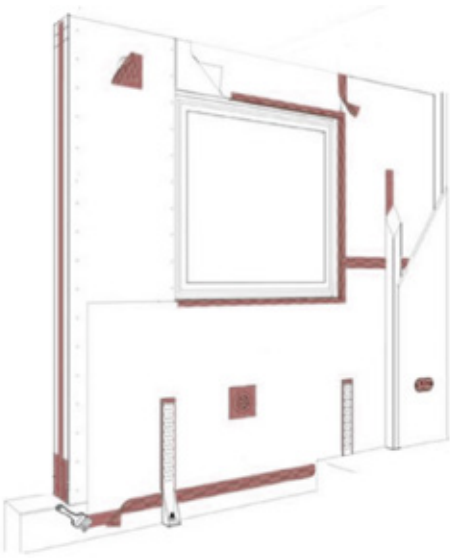


Figura 43. *Sellos de hermeticidad en la envolvente*

1.2.3.4 Infiltraciones de aire en Ventanas

En todo tipo de edificaciones el diseño debe procurar lograr la hermeticidad de la envolvente para evitar puentes térmicos en encuentros críticos. En edificaciones con elementos prefabricados se debe tener especial consideración con la instalación de ventanas, que puede realizarse tanto en planta como en obra, dependiendo del nivel de prefabricación de los elementos.

La incorporación de ventanas en los elementos implica un especial cuidado debido a la fragilidad de los elementos y debe considerarse el tipo de transporte, las estrategias de protección de los elementos, el estado de la ruta por donde se realizará el traslado y la estrategia de montaje. El nivel de prefabricación de los elementos puede ser alto e implicar ventanas instaladas, lo que significa también una mayor complejidad en las labores logísticas y la participación y coordina-

33. Citec UBB y DECON UC, «Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones».

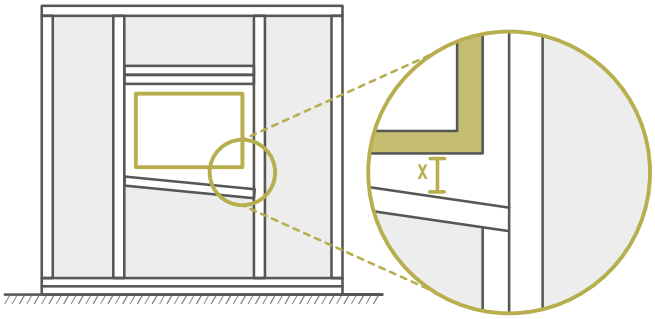


Figura 44. *Errores en la nivelación de elementos estructurales prefabricados*

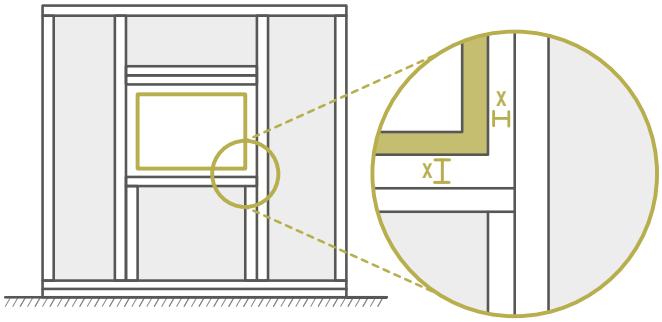


Figura 45. *Tolerancias en la estructura de vanos*

ción de múltiples involucrados en el proceso para una ejecución exitosa.

En el caso de que las ventanas sean parte del kit de entrega, debe determinarse el nivel de prefabricación que alcanzarán los elementos prefabricados y la estrategia de incorporación de ventanas en los paneles o módulos, de acuerdo a las capacidades de la empresa industrializadora y la estrategia más conveniente para el proyecto.

Si el proyecto implica la incorporación de ventanas en la etapa de construcción en el sitio, es necesario evaluar la estrategia a utilizar. En este caso, la empresa industrializadora puede evaluar la opción de incluir las ventanas como parte de un kit de elementos, junto con otros elementos que deban ser instalados en obra. Por otro lado, la compra e instalación de ventanas podría estar a cargo de la empresa constructora que ejecuta las partidas en la obra.

Como se observa en la figura, un aspecto crítico en la instalación de ventanas es la verificación del correcto dimensionamiento del vano, especialmente cuando se construye a gran escala. Las tolerancias deben permitir una instalación correcta sin afectar la composición de la ventana debido a un vano con dimensiones menores, o, por el contrario, grandes holguras entre la ventana y la estructura del panel. Estas dimensiones dependerán de la solución constructiva a efectuar y las capas de materiales consideradas. El dimensionamiento del vano debe contemplar el diseño de la solución y el tipo de estrategia a utilizar para asegurar la hermeticidad de la ventana y evitar infiltraciones de aire. El Manual de Tolerancias para Edificaciones[34] entrega lineamientos respecto a las tolerancias recomendadas para ventanas y otros elementos.

El esfuerzo presente en proyectar viviendas con ventanas de doble vidriado hermético y baja transmitancia térmica debe aplicarse también en las especificaciones técnicas para los sellos, puesto que, de esta manera es posible aprovechar al máximo las ventajas de una ventana con buena aislación térmica. En casos donde esto no suceda, se corre el riesgo de efectuar grandes inversiones económicas en ventanas de calidad que finalmente no se verán reflejadas en el comportamiento de la vivienda.

Junto con evitar las infiltraciones de aire en la instalación de ventanas, también es importante considerar la continuidad de barreras de humedad y de vapor para evitar la condensación por los cambios de temperatura generados en vanos y la instalación de cortagoteras para la correcta evacuación de aguas lluvia.

34. Corporación de Desarrollo Tecnológico y Cámara Chilena de la Construcción, «Manual de Tolerancias para Edificaciones».

1.2.3.5 Revestimiento exterior

La durabilidad y extensión de la vida útil de una edificación se vincula con la calidad de cada uno de sus elementos y la correcta ejecución de las soluciones.

El revestimiento exterior de los muros puede estar incorporado a los elementos desde la planta o ser instalado posteriormente en la obra, pero en cualquier caso su incorporación debe estar pensada desde el inicio del proyecto.

En casos donde el revestimiento sea instalado en la planta, debe existir especial cuidado en proteger los elementos para que no sufran quiebres o roturas durante la fase de transporte hacia el sitio y además, se deberán proveer las indicaciones de reparación en caso de que esto ocurra.

El revestimiento exterior tiene la función de otorgar durabilidad a la edificación, por lo tanto, es importante asegurar su continuidad a través del diseño, especialmente en edificaciones panelizadas, donde existen múltiples encuentros de diferentes tipos. La hermeticidad de la envolvente debe existir tanto en encuentros del mismo material, como materialidades diferentes, y se debe asegurar a través de cintas, traslapes de materiales u otros elementos o materiales que lo permitan.

En edificaciones modulares, es necesario verificar el espacio vacío que queda entre un módulo y otro, y la manera en que esto puede afectar el comportamiento térmico de la edificación. El diseño de la envolvente debe buscar reducir la cantidad de puentes térmicos, a través de soluciones que aseguren el encuentro entre paneles o entre módulos, que presentan una mayor superficie a unir.

En proyectos de vivienda desde dos pisos es importante el diseño del detalle constructivo de la envolvente, de manera de asegurar la continuidad del revestimiento exterior y asegurar su desempeño térmico y la reducción de infiltraciones de aire por montajes mal ejecutados, ya sea en casos donde el revestimiento se instale en la planta como cuando se instala en el sitio.

Figura 46. Encuentro entre módulos

Figura 47. Detalle de encuentro entre módulos

1.2.3.6 Techumbre

La interacción entre los diferentes elementos de la envolvente es un aspecto que debe ser evaluado en la etapa de diseño, tanto respecto a las conexiones, como los sellos y aspectos constructivos.

El diseño de techumbre para edificaciones panelizadas puede considerar dos alternativas de ejecución:

1. Uso de cerchas, las cuales pueden ser prefabricadas por la empresa industrializadora, cuyas soluciones constructivas pueden variar, dependiendo de la maquinaria disponible.

2. Panelizada. La cubierta de la edificación puede ser edificada con paneles, al igual que muros o entrepisos. En este caso, es importante que el equipo de diseño evalúe la manera en que se efectuarán los encuentros que involucren ángulos y que puedan ser resueltos con cortes o con la adición de elementos. Algunas de las máquinas utilizadas para la prefabricación en madera no permiten cortes en ángulo diferente a los 90°, por lo tanto, debe evaluarse las soluciones y su implicancia en el nivel de prefabricación que se quiere lograr.

Cuando corresponda, las soluciones determinadas para la cubierta deberán considerar todas las particularidades asociadas a la instalación de colectores solares o paneles fotovoltaicos, que pueden tener requisitos especiales de instalación. De igual manera, los ductos de ventilación de alcantarillado, chimeneas u otros deben estar considerados también, tanto las perforaciones requeridas como las espumas o productos utilizados para sellar encuentros.

Debido a su rol de protección frente a aguas lluvia, la cubierta se compone por diversos elementos que permiten dar hermeticidad a esta parte de la envolvente. Es importante considerar sellos para cada uno de los ductos que atraviesen la techumbre, como ductos de ventilación de alcantarillado, ductos para paneles fotovoltaicos, chimeneas, entre otros. Las soluciones constructivas empleadas y su correcta ejecución permitirán proteger la edificación frente al riesgo de infiltraciones de agua por el borde de los ductos.

La ejecución de hojalaterías debe estar considerada, junto con la definición de la etapa en la que se incorporarán y los detalles constructivos de cómo se integran los elementos prefabricados con las obras en el sitio. Deben estar considerados todos los encuentros críticos como cumbrera, canaletas, entre otros.

1.2.3.7 Aspectos críticos en el diseño de envolventes

Tanto en edificaciones panelizadas como modulares, el diseño de envolventes debe considerar todos los aspectos necesarios para un buen desempeño, en su rol de interfaz entre el interior y el exterior. Algunos aspectos críticos a tener en consideración durante la fase de diseño son:

1. El encuentro entre los diferentes elementos que componen la envolvente, con el foco en generar continuidad entre ellos. Las tolerancias deben ser estudiadas para permitir resolver diferencias dimensionales que podrían darse. La discontinuidad entre elementos de la fachada podría conllevar efectos negativos como la infiltración de agua hacia el interior.

2. El diseño debe incorporar la especificación de sellos, espumas o elementos que permitan dar continuidad a membranas y materiales, con el fin de asegurar el comportamiento de la envolvente y evitar efectos no deseados. La discontinuidad de membranas podría generar condensación intersticial o superficial y esto afectar la resistencia estructural de las soluciones.

3. El diseño de fachadas debe considerar los procesos constructivos de la etapa de montaje, como las conexiones de ductos entre paneles o módulos, que podría conllevar un grado de complejidad mayor. La ejecución defectuosa de conexiones podría conllevar riesgos para la seguridad de los habitantes.

4. El diseño de ventanas y puertas debe considerar tolerancias y sellos, los cuales deben ser especificados para dar continuidad a la envolvente y aprovechar las propiedades de las ventanas, en el caso de aquellas con buenas propiedades térmicas. La falta de especificaciones para el montaje de ventanas podría repercutir en el comportamiento térmico de esa fachada y también en aspectos estéticos.

5. Personalización de fachadas es un asunto que debe ser evaluado en conjunto por el equipo de diseño y la empresa industrializadora, de acuerdo a sus capacidades y el impacto que pueda tener en la línea de producción. Es importante que el diseño responda a criterios de estandarización para facilitar procesos de industrialización, sin embargo, esto no debe significar la perdida de sus cualidades arquitectónicas. El diseño para la industrialización debe combinar la producción en masa con la flexibilidad en el diseño, considerando alternativas de personalización para el usuario sin perder el control en la producción.

6. El diseño de encuentros entre elementos debe poseer flexibilidad para considerar cambios dimensionales producidos por cambios de temperatura.

Todos los aspectos mencionados implican un análisis del equipo de diseño en conjunto con la empresa industrializadora, con el fin de establecer las condiciones para dar cumplimiento a los requisitos y, por otro lado, la necesidad de implementar controles de calidad necesarios durante el proceso tanto en planta como en el sitio.

1.3 Consideraciones de calidad

Una de las características de la construcción industrializada es la posibilidad de desarrollar procesos constructivos en un entorno controlado, lo que permitiría reducir la variabilidad en comparación con procesos de construcción tradicional. La estandarización de procesos y de elementos puede garantizar la calidad y repetibilidad de los productos generados, de acuerdo a las características del diseño y con las consideraciones del proceso productivo. Por este motivo, la industrialización de la construcción presenta una oportunidad para mejorar la calidad de los elementos prefabricados y la edificación completa.

Junto con mejoras en la calidad de los elementos y elementos prefabricados, es importante la correcta estandarización de procesos constructivos en el sitio para una ejecución que garantice el resguardo de la calidad de los elementos y de la edificación. A través de la estandarización de procesos se optimizan los trabajos en el sitio, al reducir los tiempos de aprendizaje, además se facilita la precisión y predictibilidad de la planificación y se favorece la escalabilidad de la construcción.

A nivel de diseño, deben evaluarse las soluciones constructivas que sea posible ejecutar por la empresa a cargo de la prefabricación de elementos, dependiendo de la cantidad de capas, espesor, pesos y la precisión requerida en cada detalle. La definición de soluciones deberá contar con la aprobación de la empresa encargada de la prefabricación, para asegurar el desempeño proyectado de los elementos o elementos y la calidad de la ejecución. En el caso de canterías y encuentros críticos entre elementos, la empresa prefabricadora tendrá que evaluar la factibilidad de esas soluciones para determinar si es posible su ejecución o proponer alternativas.

Figura 49. Detalles constructivos a considerar, como encuentros entre módulos.

1.3.1 Durabilidad

El diseño de elementos, soluciones y detalles constructivos debe considerar la protección frente a condiciones que puedan afectar su durabilidad y generar efectos negativos como la corrosión, exceso de humedad, condensación o cualquier tipo de desgaste estructural o material. A través del diseño es posible generar estrategias que extiendan la vida útil de los elementos prefabricados y de la edificación en sí.

El diseño debe considerar tanto las soluciones constructivas de elementos prefabricados como aquellos trabajos que se realizan en el sitio. Por otro lado, es importante la entrega de un manual de uso y cuidado de la edificación a los usuarios, que proporcione información relevante respecto a acciones que puedan colaborar con el resguardo de las características de la edificación. La mantención preventiva debe considerarse como medida de protección y cuidado de las edificaciones ante diferentes aspectos.

La edificación en zonas costeras y zonas húmedas o lluviosas podría afectar a conectores y elementos susceptibles a la corrosión, por lo tanto, todos estos elementos deben contar con protección a través del diseño para evitar este proceso. A través del diseño es posible preservar las propiedades de los elementos metálicos, otorgar durabilidad y reducir la necesidad de reemplazos y reparaciones frecuentes. Junto con el diseño, es importante generar instrucciones sobre la periodicidad de mantenciones y los aspectos a evaluar en estas instancias, para evitar la corrosión y la reducción de la vida útil de elementos metálicos. La importancia de las mantenciones preventivas tiene relación con la posibilidad de exposición de la estructura a condiciones que puedan debilitar su estabilidad estructural y comprometer la edificación completa, lo que se contrapone con las ventajas de la industrialización.

Además de la exposición a la humedad y la lluvia, cada diseño debe considerar la protección contra la radiación solar, que en algunas zonas puede ser un gran factor de riesgo. La radiación solar intensa puede causar deterioro en los materiales expuestos, especialmente aquellos compuestos por plásticos, maderas, pinturas y algunos tipos de revestimientos. Esta exposición prolongada puede causar decoloración, deformación, agrietamiento y degradación de la superficie de los materiales. Por estos motivos, es relevante la protección de materiales para aumentar su durabilidad y prolongar su vida útil, lo que reduce la necesidad de reparaciones y recambios de material y de esta manera, el costo de las mantenciones.

El manual de mantención debe considerar todos aquellos aspectos que permitan prolongar el adecuado funcionamiento de la edificación, su desempeño higrotérmico, resistencia estructural y resguardo de la calidad de los materiales para la extensión de la durabilidad de los elementos. Algunos aspectos clave a considerar dentro del manual son: una descripción general de la edificación, instrucciones detalladas sobre procedimientos de mantención preventiva y correctiva de los diferentes elementos, frecuencia de las mantenciones, programa de mantenciones que considere las fechas y actividades específicas a realizar, procedimientos de emergencia frente a diversas situaciones, información de seguridad, garantías y manuales de los equipos que se instalen, registro de las mantenciones y contactos de servicios especializados que puedan requerirse.

1.3.2 Preservación de la madera-grado estructural y clasificación

La durabilidad de la madera utilizada para fabricar elementos prefabricados es un aspecto importante cuando se busca generar productos de calidad y extender el ciclo de vida de una edificación. Debido a sus características estructurales,

El uso de madera con bajo contenido de humedad, grado estructural determinado e impregnación contribuye a generar elementos con mayor estabilidad dimensional, conexiones con mayor durabilidad, mejor protección contra agentes biológicos como termitas u hongos y mayor certidumbre respecto al cumplimiento de normativas aplicables al uso de madera en la construcción.

A través del Decreto de rotulado de la madera[35], es posible establecer estándares de calidad desde el diseño, que pueden verificarse

35. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo y Subsecretaría de Economía y empresas de menor tamaño, «Decreto 11 Aprueba reglamento que establece requisitos de rotulación de la madera estructural para construcción». Conforme a la disposición transitoria de la norma, el reglamento entra en vigencia transcurridos 180 días de su publicación (22 de septiembre de 2023) y para empresas que califiquen como micro o pequeñas empresas entrará en vigencia transcurridos 240 días desde su publicación

posteriormente en la planta de prefabricación. El rótulo de la madera para uso estructural contiene la siguiente información:

- Identificación del proveedor
- País de origen
- Especie
- Terminación: Dimensionado o cepillado.
- Dimensión: NCh 2824 o NCh 174, según corresponda. Escuadría según denominación comercial, dimensión en milímetros y largo en metros.
- Contenido de humedad: CH>20%
- Grado estructural: GS, G1, G2, C16, C24, MGP10, MGP12 para Pino Radiata. Para otras especies, según NCh 1970/1 y NCh 1970/2.
- Preservación: Tipo de preservante y la clase de riesgo.

Debido a que pueden existir elementos ocultos en un panel o módulo, la calidad de las conexiones puede verificarse solamente en la planta prefabricadora, por lo que es importante el uso de madera que asegure la calidad de las conexiones y de la solución. La empresa prefabricadora es la responsable de establecer relaciones contractuales con proveedores de productos y materiales que contribuyan en el desarrollo de soluciones con la calidad comprometida, y posteriormente realizar chequeos de calidad, mientras que el diseñador debe verificar que las soluciones ejecutadas cumplan con las características y requisitos del diseño original para un comportamiento adecuado.

El uso de madera con alto contenido de humedad puede generar problemas como grietas o deformaciones que pueden incidir en las dimensiones y calidad de los elementos prefabricados, especialmente durante las etapas de transporte y montaje, donde se ven expuestos constantemente a diversas cargas por manipulación. Las diferencias de plomo en la estructura de un panel podrían generar roturas en los materiales de terminación como yeso cartón o fibrocemento, por lo tanto, es oportuno evitar estos inconvenientes desde un inicio.

Por otro lado, la maquinaria utilizada en procesos de prefabricación permite trabajar con una precisión milimétrica en cada elemento, por lo tanto, el uso de elementos con estabilidad dimensional entrega la posibilidad de hacer cortes precisos o intervenciones que faciliten y agilicen el desarrollo del montaje.

1.3.3 Tolerancias

Las tolerancias corresponden a variaciones permitidas en las dimensiones, formas o posiciones de los elementos constructivos con respecto a sus medidas o ubicaciones especificadas en la planimetría o diseño. En el contexto de la construcción industrializada, las tolerancias son especialmente importantes para el éxito en el proceso de montaje, para garantizar que los elementos prefabricados (paneles o módulos) encajen perfectamente cuando se monten, ya que las pequeñas variaciones podrían afectar la alineación y la integridad estructural de la edificación. Por lo tanto, los estándares de tolerancia deben ser definidos y seguidos meticulosamente durante todo el proceso de fabricación y montaje para asegurar la calidad y la precisión del proyecto. La disponibilidad de maquinaria CNC entrega la oportunidad de realizar cortes con alta precisión y producir grandes cantidades de elementos con tolerancias consistentes.

La repetibilidad a gran escala que involucra la construcción industrializada requiere el uso de estrategias que permitan la conexión de elementos sin problemas y resguardar la consistencia en la calidad de los elementos durante el proceso. Esto es crucial para que los elementos

sean intercambiables y se ajusten perfectamente durante el montaje.

Las tolerancias bien controladas ayudan a optimizar la eficiencia en el proceso constructivo. Si se mantienen las medidas correctas, se reduce la necesidad de retrabajo o ajustes posteriores, lo que a su vez acelera el proceso de construcción. Junto con el diseño de tolerancias, existe la posibilidad de emplear materiales específicos para la solución de juntas y encuentros entre elementos, que absorban las diferencias o irregularidades que pueda existir.

Figura 50. Junta sellante comprimible para uniones irregulares

En relación a la generación de residuos, cuando los elementos o elementos se fabrican dentro de los límites de tolerancia permitidos, se reduce la cantidad de material desperdiciado o de piezas defectuosas que podrían requerir reemplazo o reparación, lo que también puede tener impacto en los costos.

La definición de tolerancias para el montaje permite absorber la acumulación de errores que pueda existir en el proceso y evitar que estos afecten las siguientes fases de montaje, en conjunto con estrategias de control de calidad que permitan evaluar y corregir errores dimensionales tanto en los elementos como en el montaje.

El equipo de diseño debe evaluar cada aspecto del proceso de montaje con la empresa prefabricadora y el equipo de montaje, para generar diseños que contemplen las tolerancias adecuadas para cada encuentro en particular y anticipar soluciones a aspectos críticos. Posteriormente, las decisiones deben ser informadas a todos los equipos involucrados en el proceso de montaje, en conjunto con las instrucciones.

En el caso de la instalación de conectores, las tolerancias pueden ser muy ajustadas y el éxito del montaje va a depender de la correcta ejecución de cortes o rebajes necesarios. En estos casos, cada detalle constructivo debe ser preparado con precisión, porque de lo contrario podrían generarse importantes retrasos durante la etapa de montaje.

La elaboración de prototipos durante la etapa de diseño permite entender aspectos constructivos del montaje que pueden ser optimizados, solucionar encuentros críticos o realizar comprobaciones. Los prototipos pueden ser tanto físicos como digitales y su elección dependerá del aspecto que se quiere evaluar.

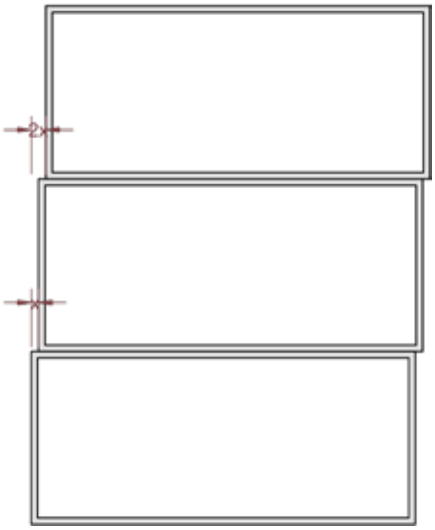


Figura 51. Acumulación de errores en la instalación de elementos prefabricados

Figura 52. Transporte de módulo prefabricado

1.3.4 Transporte

En la construcción tradicional, el transporte suele involucrar la entrega de materiales a la obra, como ladrillos, cemento, madera y otros elementos. Aunque es relevante en términos de logística y gestión de suministros, su impacto en la construcción real es relativamente limitado. La construcción tradicional se lleva a cabo en el sitio, y los materiales suelen ser estándar y fáciles de transportar en camiones u otros medios convencionales.

Por otro lado, en la construcción industrializada, el transporte es esencial ya que implica el traslado de paneles o módulos prefabricados completos desde la planta de prefabricación al sitio de emplazamiento del proyecto. Estos módulos pueden ser elementos de estructuras completas de edificios, como unidades de vivienda, oficinas, baños, entre otros, que se montan en el sitio. La eficiencia en el transporte es crucial, ya que afecta directamente la planificación, costos y tiempos de entrega del proyecto. Además, la manipulación y el transporte de módulos grandes y a menudo pesados requieren una logística detallada, incluyendo permisos especiales de transporte y consideraciones de seguridad.

Debido a que la construcción industrializada puede significar el movimiento de módulos prefabricados completos y terminados, corresponde a una etapa crítica y altamente estratégica en comparación con la construcción tradicional.

La entrega de un proyecto industrializado que posea instrucciones detalladas respecto a cómo realizar el transporte es una ventaja para la culminación exitosa del proyecto, debido a que esta etapa implica cargas y exigencias no contempladas en un proyecto tradicional. El equipo de diseño debe ser capaz de anticipar los nuevos requerimientos, debido a que el proyecto podría verse afectado si éstos no son contemplados en el diseño estructural y constructivo.

La ejecución de proyectos de vivienda tipo industrializada considera la entrega de antecedentes de industrialización, entre los cuales, se contempla:

- Especificaciones del tipo de camiones que realicen el transporte de elementos o elementos, con información como dimensiones, tonelaje, accesos a la obra, sector de acopio, condiciones del camino y lo que se considere pertinente para un traslado correcto.

- Instrucciones de manipulación de los elementos o elementos durante el proceso de transporte. Esta información es especialmente relevante si el transporte lo realiza una empresa diferente a la industrializadora.

- Instrucciones de izaje con un detalle de los procedimientos y la maquinaria necesaria para llevar a cabo el proceso.

Dentro de los antecedentes relevantes a considerar para el diseño en esta etapa se destaca la protección de elementos, las características del camión a utilizar, el proceso de izaje, carga y descarga, y la selección de la estrategia de entrega de elementos o elementos prefabricados. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes para llevar a cabo cada una de estas actividades.

1.3.4.1 Protección de elementos

La fase de transporte puede ser crítica para lograr los estándares de calidad requeridos, debido a la dificultad de control de todo el proceso, como puede ocurrir cuando el transporte se realiza en caminos rurales o en mal estado. Por este motivo, es necesario generar estrategias que permitan absorber los inconvenientes asociados.

En el caso de que el proyecto incorpore elementos con un alto grado de prefabricación, como terminaciones con pintura, ventanas o fachadas pre-instaladas, los elementos son más susceptibles a sufrir daños como quiebres o marcas, por lo tanto, es indispensable diseñar estrategias de protección para aprovechar las ventajas de su alto grado de prefabricación. En el caso de paneles o módulos que solamente consideren estructura, es importante su protección para evitar deformaciones de la madera o la corrosión en elementos de conexión.

El diseño debe considerar estrategias de protección tanto para la fase de transporte como para el período de acopio en el sitio, en el caso de que sea necesario, sin embargo, el tiempo de acopio debe ser minimizado para resguardar la calidad y durabilidad de los elementos y evitar daños mecánicos o por condiciones ambientales.

Para la fase de transporte, es necesario evaluar:

- Elementos que sobresalgan de la estructura y puedan ser susceptibles a quiebres, como placas arriostrantes o revestimientos exteriores de paneles. En estos casos se puede evaluar la posibilidad de instalar elementos provisorios que puedan ser retirados durante el montaje definitivo del elemento y que permitan proteger las zonas frágiles.

- La inclusión de ventanas en los elementos implica la consideración de protecciones tanto para los cristales como para marcos o sistemas de apertura.

- Los elementos de terminación como pinturas o revestimientos requieren protecciones que resguarden la calidad de los elementos y eviten trabajos de reparación o rehacer labores que no fueron contempladas en el trabajo en terreno.

Para el acopio de elementos, es necesario evaluar:

- **Características de los elementos:** Dimensiones, materiales y pesos.

- **Características del sitio:** Las dimensiones y pendiente del terreno deben ser conocidas para evaluar la factibilidad del almacenamiento en el sitio.

- Tipo de **izaje y maquinaria** asociada para el diseño de la logística.

- **Optimización del almacenaje:** Posibilidades de apilamiento y manipulación de los elementos dentro del terreno, de acuerdo a indicaciones de la empresa industrializadora

que fabrica los elementos, detallando el límite máximo de unidades a apilar.

- **Carta Gantt:** conocer los tiempos de la obra permite evaluar las medidas de protección, debido a que pueden variar dependiendo si el tiempo de acopio es temporal o se puede prolongar e implicar temporadas de mal tiempo como lluvia o humedad. La evaluación de riesgos permitirá determinar las estrategias de protección.

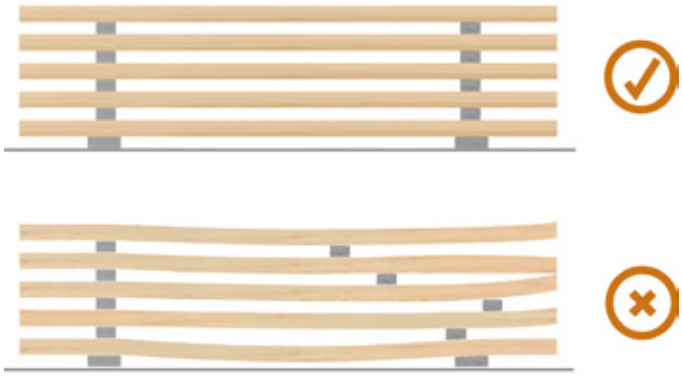


Figura 53. Estrategia de acopio de elementos prefabricados

El diseño de los métodos de protección de elementos debe realizarse en la fase de diseño del proyecto, debido a que incide directamente en las decisiones de diseño tanto de dimensiones como la definición de materiales y soluciones constructivas a utilizar.

Actualmente en Chile no existe un estándar de protección de los elementos, sin embargo, su consideración permite a la empresa industrializadora cumplir con sus compromisos e incrementar la certidumbre del proceso tanto en el cumplimiento de plazos, costos y gestión. El ingreso de viviendas industrializadas tipo considera dentro de los antecedentes de industrialización, la entrega de instrucciones de acopio, donde se detallan las condiciones en las cuales se deben almacenar los elementos o elementos, con el fin de resguardar su integridad.

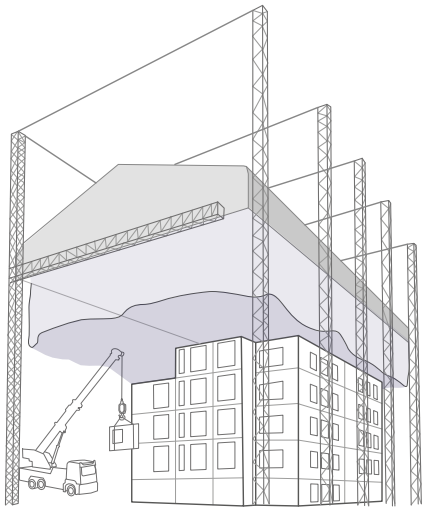


Figura 54. Carpa de protección temporal para la etapa de montaje

1.3.4.2 Dimensiones de un camión

La legislación vigente en Chile define los pesos máximos de carga y dimensiones máximas que debe cumplir un vehículo para su libre circulación en el territorio nacional[36], por lo tanto, la disposición de la carga de paneles o los módulos debe cumplir con estos requisitos.

Para un traslado exitoso de elementos, los responsables deben evaluar con anticipación otros aspectos para cumplir con un traslado exitoso de elementos y elementos:

- Estado de la ruta
- Alturas máximas en el camino
- Ancho de calle mínimo necesario para la circulación
- Radio de giro para el viraje mínimo
- Restricciones específicas de calles de la ruta definida
- Estado y características del acceso al sitio de emplazamiento del proyecto (Ancho, pendiente, espacio disponible, etc.)

36. Ley de Tránsito.

En ocasiones donde la carga exceda los pesos y dimensiones máximas permitidas, el desplazamiento del vehículo deberá contar con escolta, que se encargará de verificar el correcto desplazamiento del vehículo. Este servicio implica su gestión y un costo extra que debe ser considerado en el presupuesto del proyecto, especialmente si el desplazamiento se realiza entre regiones distantes.

1.3.4.3 Izaje, carga y descarga

La descarga de elementos depende de la modalidad de entrega: *Just in time* (JIT) o acopio en el sitio, que es definida previamente y coordinada entre la empresa industrializadora y la empresa encargada del montaje.

En una entrega *Just in time*, los elementos llegan al sitio en un camión, justo a tiempo para ser descargados y montados directamente en su ubicación definitiva, sin necesidad de ser almacenados en el terreno. Este tipo de entrega debe tener un alto grado de coordinación y depende de la ejecución a tiempo de obras previas necesarias para realizar el montaje, como pueden ser las fundaciones, trazados, instalación de ductos, la instalación de soleras de montaje o la finalización de pisos inferiores en el caso de edificios. Para este tipo de entrega, la empresa industrializadora debe generar un cronograma de trabajo que funcione de tal manera que exista el suministro de materiales adecuado para la fabricación de elementos y la fabricación se realice en los tiempos estipulados para cumplir con los plazos comprometidos.

En el caso de que la fecha de entrega de elementos no corresponda con la fecha de montaje, será necesario preparar la zona de almacena-

Figura 55. Izaje de módulo Torre Peñuelas

miento y disponer lo necesario para proteger los elementos hasta el momento en que se realice el montaje.

La maquinaria utilizada para realizar el izaje va a depender de las características de los elementos, por lo tanto, es necesario conocer las dimensiones y pesos de los elementos para definir el tipo de grúa a utilizar. Además, la planificación del izaje debe considerar la ubicación que tendrá la grúa en el terreno y la distancia hacia la ubicación definitiva que tendrán los elementos, para definir el tipo de grúa y en el caso de una grúa móvil, el largo del brazo a necesitar.

Para la optimización de costos y logística, en proyectos donde las dimensiones lo permitan, es posible utilizar un tipo de maquinaria que efectúe tanto el transporte como el izaje de elementos. Si esta determinación se realiza al inicio del proceso, podría incidir en el diseño de los elementos y su ajuste para permitir esta alternativa.

El izaje de elementos requerirá la definición de una estrategia de izaje, donde se definan los elementos de amarre que se utilizará, de acuerdo a las características de los elementos (si son paneles o módulos y su peso). El izaje debe priorizar el resguardo estructural de los elementos y la protección de materiales de terminación y membranas o materiales internos.

1.3.4.4 Estrategias de entrega de elementos o elementos prefabricados

Los alcances de la empresa industrializadora dentro del proceso constructivo deben ser definidos durante la etapa de diseño y planificación, para establecer el tipo de contrato a utilizar y las responsabilidades de esta empresa, la constructora y cada uno de los involucrados.

La definición del nivel de prefabricación de los elementos a utilizar permite evaluar los elementos que están siendo considerados en la prefabricación y aquellos que se incorporan en obra y es necesario definir el tipo de entrega que realiza la empresa industrializadora para establecer las estrategias de trabajo.

El nivel de entrega elemental es el que considera únicamente elementos con la obra gruesa de la edificación, por ejemplo, la entrega de paneles con estructura de entramado de madera. Este tipo de entrega implica la búsqueda de otros proveedores para las partidas faltantes y la coordinación con la empresa constructora para la ejecución de esas labores en el sitio.

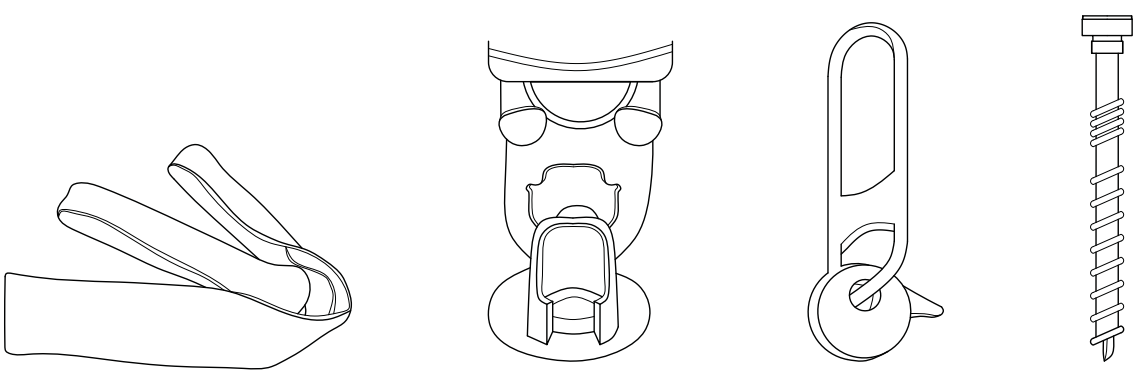


Figura 56. Tipos de anclajes para izaje de elementos y elementos

Por otro lado, el kit de partes corresponde a un tipo de entrega compuesta inicialmente por los elementos prefabricados elaborados por la empresa industrializadora, a los que se añade diversos elementos complementarios de la obra y los trabajos en el sitio, entre los que se puede considerar diversos elementos dependiendo del nivel de prefabricación de los elementos:

- Materiales de terminación
- Revestimientos (sin intervenir o con cortes de las dimensiones deseadas)
- Ductos de instalaciones
- Aislante térmico
- Membranas
- Artefactos eléctricos
- Artefactos sanitarios
- Cintas y sellos
- Elementos de conexión estructural

Independiente del tipo de entrega que se utilice, será importante la coordinación entre cada uno de los involucrados para el cumplimiento de plazos, costos y compromisos contractuales.

1.3.5 Montaje

La etapa de montaje se desarrolla al final del proceso constructivo, sin embargo, diversos aspectos de esta etapa deben ser considerados durante el diseño, tales como las capacidades y calificación del equipo de montaje, el espacio disponible en el sitio para el acopio y maniobras de la grúa, las condiciones ambientales del sitio y si se utilizará una carpa temporal para la etapa de montaje, entre otros aspectos que afectan el diseño.

La definición del tipo de montaje grúa utilizada para realizar el montaje depende de diversos factores como el peso máximo de los elementos, el espacio disponible para realizar el proceso y del largo del brazo necesario para hacer el montaje.

En el caso de proyectos emplazados en sectores rurales o de difícil acceso, el estado de la ruta podría limitar las cargas máximas a trasladar, en lugar de ser definidas por criterios constructivos.

Cuando el sitio de emplazamiento es acotado, la secuencia de montaje se verá fuertemente afectada por esta variable, con el fin de asegurar el espacio necesario para las maniobras de izaje de todos los elementos y conservar su integridad y estabilidad estructural durante el proceso.

Debido a las características de la construcción industrializada, el tiempo de montaje es relevante en la evaluación de un proyecto y los beneficios obtenidos al optar por este sistema.

Durante el montaje, los elementos o elementos prefabricados deben ser protegidos de la humedad para conservar sus propiedades estructurales, térmicas y la calidad de sus terminaciones. El montaje en condiciones de lluvia podría afectar considerablemente la calidad de los elementos, por lo tanto, es importante considerar alternativas de protección como pueden ser:

- Construir bajo una cubierta o carpa en el sitio
- Utilizar la estructura del piso superior para cubrir zona donde se realiza montaje *
- Uso de productos o pinturas que protejan del agua

La planificación de la secuencia de montaje es fundamental para el desarrollo de obras en el sitio y debe ser conocida y aprobada por el equipo de montaje. La experiencia del equipo de montaje y la mejora continua de esta etapa es esencial para evitar errores y la culminación exitosa del proyecto. Basados en experiencias anteriores, el equipo de montaje puede proponer alternativas que permitan facilitar y agilizar el proceso.

En zonas húmedas o lluviosas, es importante que el equipo de diseño determine si existe la necesidad de instalar estructuras temporales para proteger los elementos de las condiciones ambientales y asegurar la calidad de los elementos.

Estrategias de montaje

Existen dos principales estrategias de montaje[37]:

1. Reducir el número de operaciones en el proceso de montaje, lo que permitiría:
    - Reducir tiempos y costos de montaje, dependiendo de métodos y procesos.
    - Menor riesgo de fallas, lo que puede resultar en menores costos.
    - Mayor confiabilidad del producto
    - Menor costo de fabricación
    - Implementación más rápida
    - Capacidad para montar logísticamente
2. Reducir el número de partes en un sub-montaje y el número de sub-montajes en un montaje. El criterio para definir la necesidad de partes en un sub-montaje puede vincularse con las siguientes preguntas:
    - ¿La parte debe moverse en relación con otras partes para cumplir su función prevista?
    - ¿Debe estar hecho de un tipo de material diferente a los demás en el montaje?
    - ¿La parte habilita una capacidad en el montaje que no sería posible sin ella?
    - ¿La parte necesita ser reemplazada o mantenida más que otras en el montaje?

Si la parte no es necesaria, debe eliminarse o integrarse a otro elemento. Este proceso puede incluir la evaluación de otras partes y el montaje para determinar si es necesario simplificarlo más o si necesita reajustes para cumplir funcionalmente.

De acuerdo a algunos autores, los principios de montaje a considerar son:

- **Unidades sin cortes:** Coordinación dimensional y modular para minimizar los cortes durante el montaje.
- **Minimizar elementos:** Reduce la posibilidad de errores durante las conexiones entre elementos.
- **Fácil manejo:** Optimización de las dimensiones y peso de elementos y elementos. Codificación de elementos o utilización de métodos para aumentar la claridad respecto a las instrucciones de montaje.
- **Repetición:** Estandarización de elementos o elementos y la repetición de secuencias constructivas para un montaje más rápido y de mejor calidad
- **Simulación y prototipado:** Simulación de secuencias constructivas para anticipar posibles conflictos o interferencias.

37. Redford y Chal, *Design for assembly.*

Figuras 57, 58 y 59. Izaje y montaje de módulos

1.3.6 Desmontaje de estructuras

Como se mencionó inicialmente, la industria de la construcción es responsable de un 37% de las emisiones globales, por lo tanto, es indispensable replantear la forma en que se desarrolla la construcción. Repensar un nuevo paradigma presenta la oportunidad de avanzar hacia métodos y estrategias más eficientes y sustentables de construir, que impliquen un menor impacto ambiental, la disminución de la huella de carbono, la optimización de recursos naturales y la disminución de residuos generados por la construcción.

En Chile, debido a la obligatoriedad de la impregnación de la madera (OGUC y NCh819) para usos constructivos, no existe la posibilidad de reciclar la madera estructural de paneles o módulos, por lo tanto, se releva la alternativa de reutilizar estructuras prefabricadas de proyectos industrializados.

Actualmente la demolición de edificios implica la generación de grandes cantidades de residuos que son depositados en vertederos y complejizan los problemas medioambientales.

La problemática presenta la necesidad de cambiar desde un modelo lineal de ciclo de vida de las edificaciones hacia un modelo circular, en el cual nos hagamos cargo del fin del ciclo de vida útil de una edificación. Esta decisión presenta diversas alternativas para lograr este propósito y la industrialización posee condiciones que favorecen la posibilidad de reutilización de edificaciones.

Los fundamentos de la construcción industrializada plantean un alto nivel de precisión en el diseño de detalles y alta coordinación entre colaboradores para lograr mejoras en la eficiencia del proceso, aspectos que también son relevantes para el desmontaje de estructuras. Arup

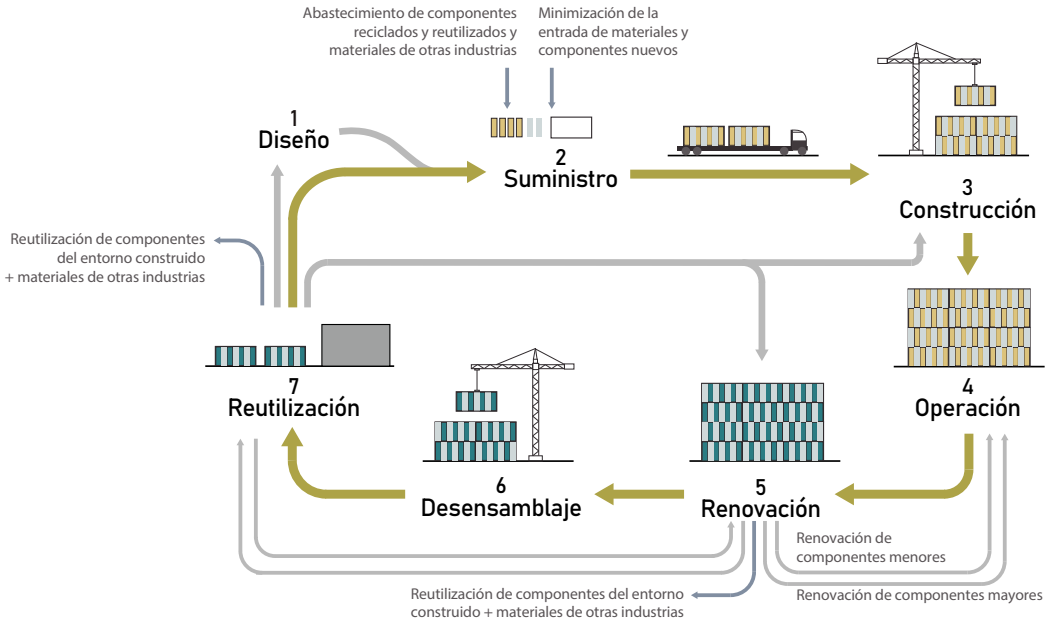


Figura 60. Aplicación de los Principios de la Economía Circular

plantea que la construcción modular presenta una oportunidad para lograr un mayor grado de reutilización y reciclaje y que el desmontaje permite una segregación más ordenada sistemática y completa de elementos prefabricados, productos y materiales[32].

Las consideraciones asociadas a los estándares de sustentabilidad del proyecto o certificaciones deben establecerse en la primera etapa, en conjunto con las consideraciones de ciclo de vida, que llevarán a la evaluación de factibilidad del desmontaje. La decisión de incorporar la etapa de desmontaje de la edificación será uno de los criterios de diseño, del cual dependerán diversos aspectos que tendrán que ser coordinados entre equipos.

Algunos autores destacan diez principios del diseño para el desmontaje (DfD)[33]:

1. Documentar materiales y métodos para el desmontaje.

2. Seleccionar materiales considerando sus impactos futuros, aquellos con alta calidad conservarán su valor y/o serán más viables para la reutilización y el reciclaje.

3. Diseñar conexiones que sean accesibles.

4. Minimizar o eliminar conexiones químicas, difíciles de separar.

5. Utilizar conexiones con tornillos, pernos y clavos.

6. Separar sistemas mecánicos, eléctricos y sanitarios.

7. Diseñar considerando al trabajador y la mano de obra para la separación.

8. Simplicidad de estructura y forma.

9. Interoperabilidad.

10. Desmontaje seguro.

De acuerdo a Guy y Ciarimboli, un proyecto que considera estrategias de diseño para desmontaje reducirá las implicaciones de costos de cambios en el proceso de diseño, al aumentar la simplificación de los sistemas y disminuir su interdependencia física.

El desmontaje de estructuras requiere la implementación de estrategias simples de demolición, que impidan cruces en el flujo de residuos y se pierdan los beneficios de la reutilización, por lo tanto, es importante que esto sea planteado desde el inicio de un proyecto y todas las estrategias de diseño consideren este aspecto.

38. ARUP, *Circular Economy in the Built Enviroment.*

39. Guy y Ciarimboli, «*Design for Disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building*».

2

Reglamentación asociada a proyectos de Vivienda Industrializada tipo

Debido a la reciente incorporación de la industrialización en el Plan de Gobierno, durante el año 2023 se generaron diversas publicaciones asociadas a la regulación de proyectos de vivienda industrializada. Por un lado, se establecieron los procesos asociados al desarrollo e ingreso de proyectos de vivienda industrializada y a quiénes podrían ejecutarlos y por otro lado se estableció el estándar higrotérmico mínimo que deberían cumplir las viviendas. Hasta el momento, todos aquellos aspectos que no hayan sido definidos, son regulados por normativas preexistentes para construcciones tradicionales.

2.1 Industrialización

En relación a la construcción de viviendas industrializadas tipo, el marco normativo contempla dos Resoluciones que definen tanto los procedimientos para la evaluación de empresas industrializadas hábiles para presentar proyectos de vivienda tipo industrializada, como también las condiciones y mecanismos para la aprobación de proyectos de Vivienda industrializada tipo (VIT). Junto con estos antecedentes, se ha establecido un procedimiento que agiliza el proceso de ingreso de proyectos de vivienda, que busca fomentar a que más entidades presenten proyectos.

Respecto a la calidad de las viviendas, se estableció un estándar higrotérmico especial, que implica mejoras en el confort para los habitantes, considerando el acondicionamiento térmico, ventilación y calidad del aire interior, reducción de infiltraciones de aire y la eliminación del riesgo de condensación, lo que se traduce en mayor protección de la estructura y la durabilidad de sus elementos y la vivienda.

2.1.1 Resolución Exenta N°52

Con el objetivo de definir un estándar mínimo de calidad y gestión de procesos, se ha definido un estándar mínimo de condiciones que debe cumplir una empresa que quiera ejecutar proyectos de vivienda industrializada. La habilitación de empresas se concretará en la medida en que cumplan con las condiciones descritas a continuación y cumplan con el debido proceso.

Esta resolución define los criterios y el procedimiento de evaluación y habilitación de empresas industrializadoras para la presentación de proyectos de “Vivienda industrializada tipo”, en alguna de las modalidades descritas por la Resolución N°59.

Aquellas empresas que no hayan sido evaluadas y/o que no cuenten con la certificación de la DITEC, no podrán presentar ni ejecutar proyectos de vivienda industrializada tipo.

El procedimiento de evaluación de empresas industrializadoras consta de 5 etapas:

1. **Solicitud de evaluación:** Mediante carta o correo electrónico dirigido al Jede de la División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional (DITEC).

2. **Entrevista con empresa industrializadora**

3. **Visita a la planta:** Considera la aplicación del cuestionario base, cuyos aspectos evaluados son:

    i. **Planificación y control de procesos:** Considera la participación temprana de los equipos en las diferentes etapas del proceso, uso de normativa en los proyectos y metodologías de control de calidad.

    ii. **Desarrollo de sistemas técnicos:** consideraciones de diseño, consideraciones de montaje y consideraciones de transporte.

    iii. **Construcción de partes de la edificación off-site:** definición del proyecto y el producto entregado a los usuarios, el grado de prefabricación según dimensión (unidades lineales, bidimensional o tridimensional), el grado de prefabricación según grado de finalización del producto prefabricado (obra gruesa / obra gruesa e instalaciones / obra gruesa, instalaciones y terminaciones) y el desglose de procesos prefabricados.

    iv. **Relaciones a largo plazo:** duración de la asociación con las empresas con que trabaja.

    v. **Logística integrada en el proceso de construcción:** nivel de infraestructura, secuencia de fabricación, estrategias de acopio y almacenaje, nivel de producción según maquinaria utilizada, equipo técnico involucrado, equipo de mano de obra, elaboración y entrega de manuales o instrucciones de construcción y recepciones en las diversas etapas del proceso.

    vi. **Enfoque en el consumidor:** oferta de tipologías de vivienda.

    vii. **Uso de tecnologías de la información y la comunicación:** uso de software de diseño, producción, gestión y uso de BIM por proceso (diseño, obras previas, obra gruesa, instalaciones, terminaciones, transporte, montaje y obras on-site).

    viii. **Medición del rendimiento:** nivel de producción de la empresa semanal y mensual.

La evaluación se realiza mediante puntaje, donde cada uno de los 8 ítems del cuestionario puede obtener un puntaje del 1 al 5 y una ponderación específica.

4. Emisión de informe con resultado de la evaluación:

5. **Aprobación de la empresa:** Incorporación de la empresa al listado oficial de empresas industrializadoras autorizadas por la *DITEC*.

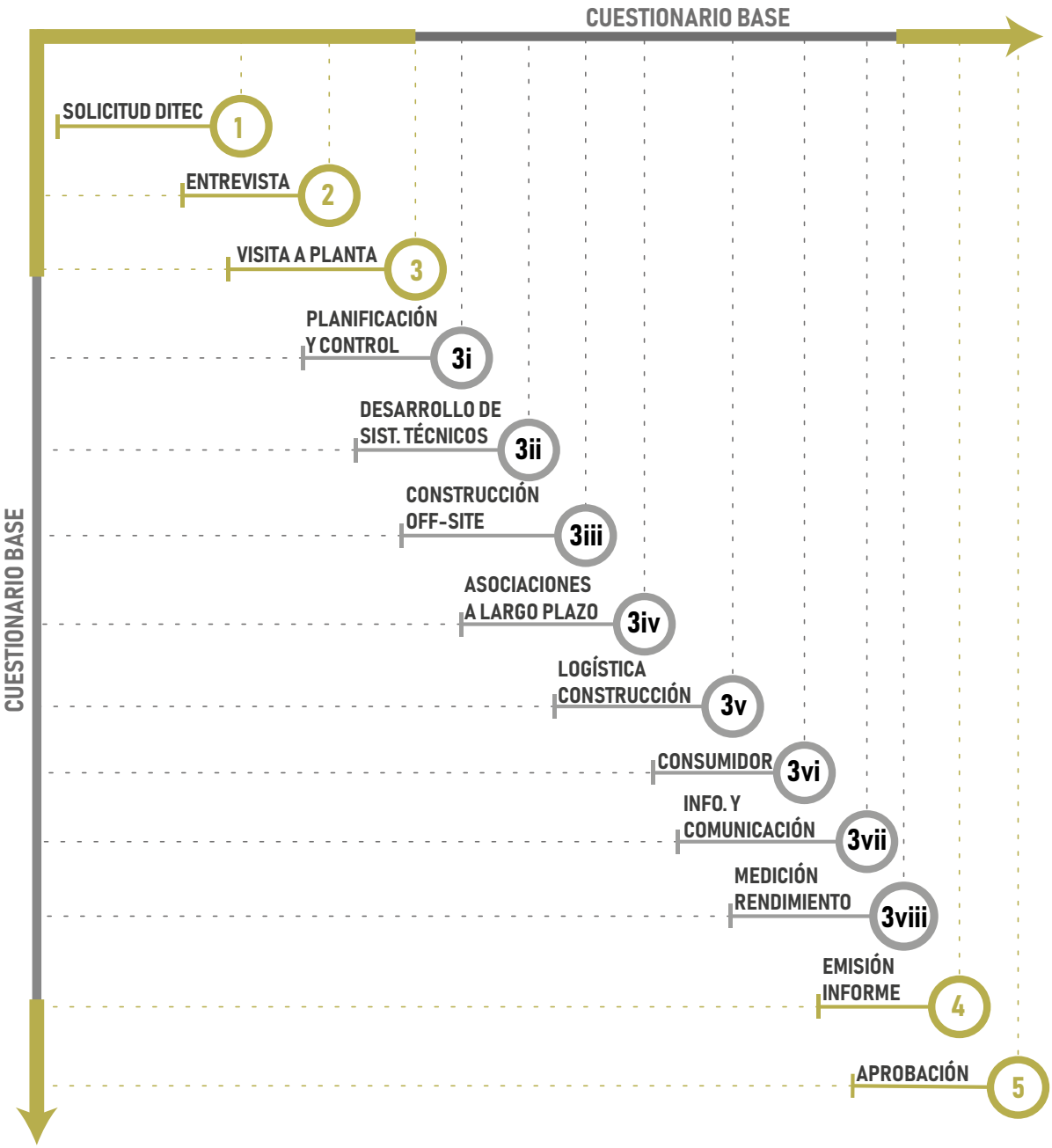


Figura 61: *Etapas del procedimiento de evaluación de empresas industrializadoras*

2.1.2 Resolución Exenta N°59

Debido a la amplitud de interpretaciones respecto a las posibilidades y niveles de industrialización que puede tener un proyecto, es indispensable definir las condiciones mínimas de uno que quiera ser presentado a evaluación.

La industrialización implica un nivel de complejidad que puede ser abordado desde diversas perspectivas y considerar múltiples métodos de resolución. En la medida en que los actores implicados se involucren más tempranamente, podrían percibirse mayores beneficios en el proceso. En este sentido, se plantean diversas asociaciones que podrían darse para la ejecución de proyectos, con el objetivo de abarcar todas las etapas y aspectos necesarios para el desarrollo de un proyecto y la entrega de viviendas con las condiciones esperadas.

La Resolución mencionada define el procedimiento de evaluación y aprobación de proyectos de vivienda industrializada tipo, que, de acuerdo a lo descrito en el ítem anterior, podrán ser presentados únicamente por empresas pertenecientes al "Listado de empresas industrializadoras autorizadas por DITEC". Hasta la actualidad se definen dos programas habitacionales asociados a la industrialización: Fondo Solidario de Elección de Vivienda (D.S. N°49) y Programa de Habitabilidad Rural (D.S. N°10).

Con el objetivo de recibir proyectos que contemplen la gestión y ejecución de partidas mínimas necesarias para la entrega de proyectos, se proponen tres modalidades de presentación de proyectos:

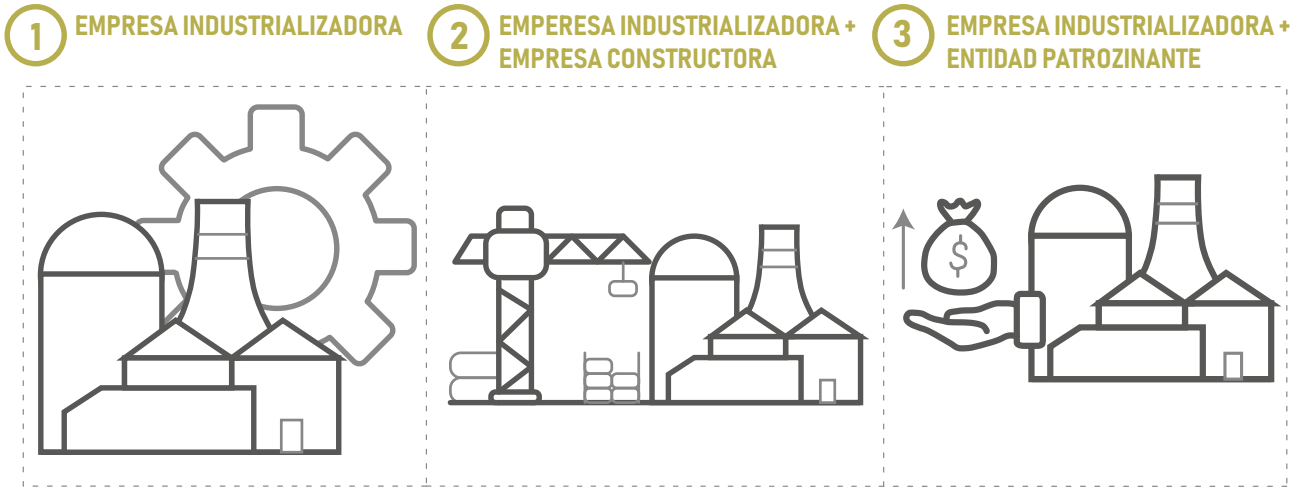


Figura 62: *Modalidades de presentación de proyectos*

De acuerdo al modelo de gestión empleado, se definirán las funciones y roles de cada parte y su coordinación se realizará internamente, pero siempre con el propósito de abarcar las áreas necesarias para la materialización del proyecto.

En los casos donde empresas constructoras o entidades patrocinantes quieran presentar proyectos de vivienda industrializada tipo, deberán contar con el patrocinio de una empresa industrializadora (que haya sido certificada por la DITEC) que respalde la fabricación de los elementos industrializados.

Los proyectos presentados deberán ser desarrollados con la lógica de la industrialización y cumplir con tres requisitos, asociados al grado de industrialización:

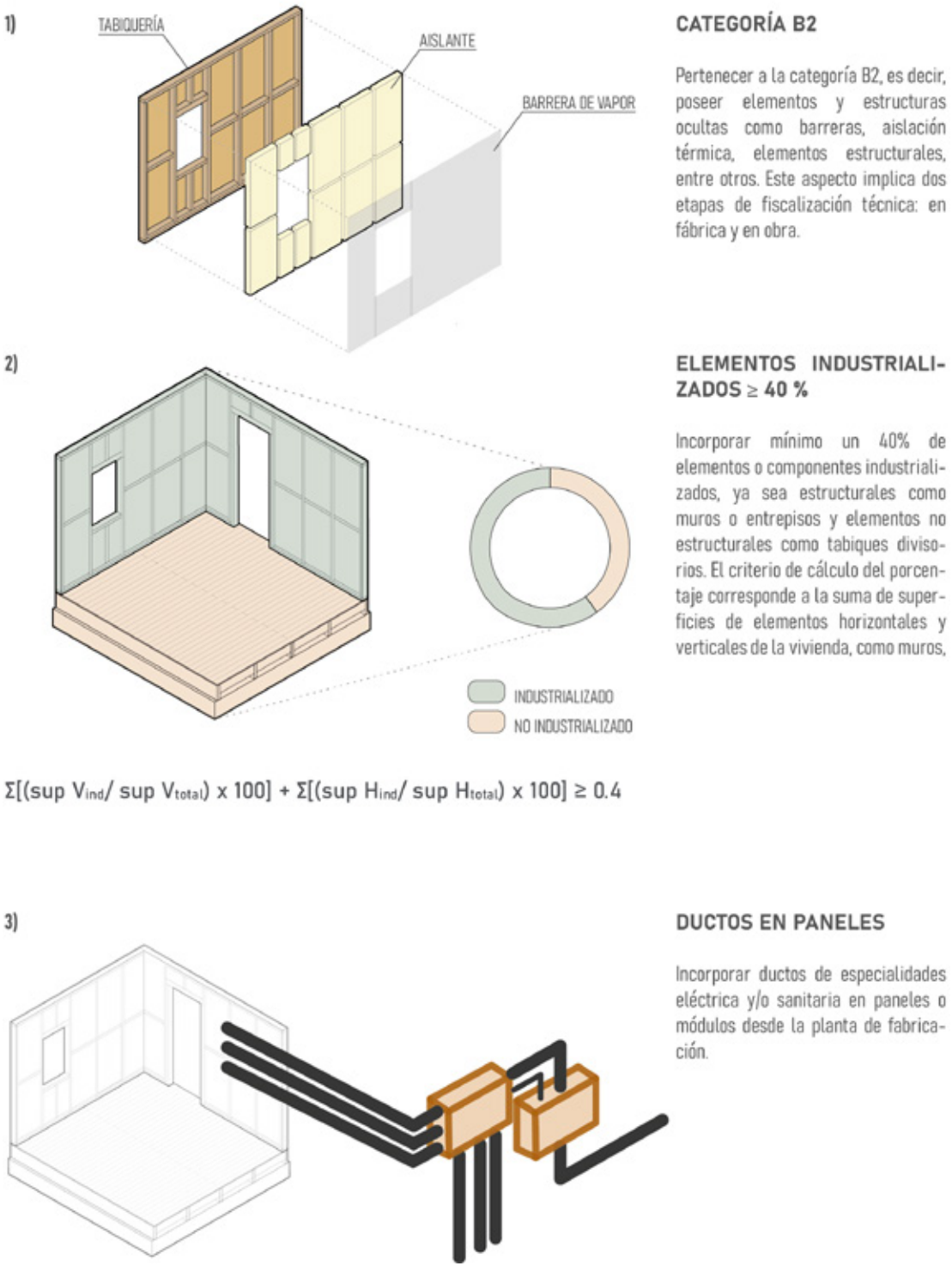


Figura 63: *Requisitos para viviendas industrializadas*

La validación del cumplimiento de los requisitos se realiza mediante la entrega de una memoria de elementos industrializados, que proporcione información detallada respecto al cumplimiento de cada requisito. Junto con esto, la verificación del cumplimiento de las soluciones constructivas declaradas en los antecedentes se realiza mediante visitas técnicas tanto a la planta prefabricadora como a la obra. El procedimiento de fiscalización se describe en el "Protocolo fiscalización técnica de obras en proyectos habitacionales industrializados. Financiamiento asistencia técnica", documento que además detalla el flujo de un proyecto, desde que se ingresa al banco de proyectos y las instancias en las cuales se entregan documentos, se realizan las visitas de fiscalización y el financiamiento de esos procesos.

A continuación, se detallan los antecedentes a presentar para la aprobación de proyectos de vivienda industrializada tipo, que se dividen en dos partes: Antecedentes generales y documentación adicional de industrialización.

Antecedentes del proyecto

1) Antecedentes generales	Ficha informativa del proyecto
2) Financiamiento	Presupuesto empresa industrializadora con todas las partidas a ejecutar en fábrica
3) Especificaciones técnicas	
4) Acreditaciones	Acreditación normativa térmica, acreditación normativa protección contra el fuego y acreditación normativa acústica. Al igual que cualquier proyecto con financiamiento estatal, las viviendas industrializadas deben contar con acreditaciones de sus elementos, que dan cuenta del cumplimiento de los requisitos térmicos, acústicos y de resistencia al fuego.
5) Proyecto de arquitectura	Plantas de cada nivel, planta de cubierta, elevaciones, corte longitudinal, corte transversal, corte escantillón y detalles constructivos.
6) Proyecto de agua potable	Planimetría, especificaciones técnicas y memoria de cálculo.
7) Proyecto de gas	Planimetría, especificaciones técnicas y memoria de cálculo.
8) Proyecto de alcantarillado	Planimetría y especificaciones técnicas.
9) Proyecto de electricidad	Planimetría, especificaciones técnicas y memoria de cálculo.
10) Proyecto de estructura	Planta de fundaciones, plantas estructurales de cada nivel, elevaciones de ejes estructurales, planta de estructura de techumbre, detalles de estructura, especificaciones técnicas de estructura, memoria de cálculo y certificado emitido por la DITEC de aprobación de sistema constructivo no tradicional y copia del legajo de antecedentes (cuando corresponda).
11) Imágenes 3d	

Documentación adicional

1) Detalles constructivos	Información técnica de los **elementos proporcionados al proyecto**, con datos mínimos como: **dimensiones, tolerancias**, entre otros. Además, se debe indicar la **secuencia constructiva de los elementos** e instrucciones respecto al medio de transporte y sus requisitos mínimos para el cumplimiento adecuado del traslado de elementos a obra.
2) instrucciones de acopio	Detalle de las **condiciones de almacenamiento** de elementos en el sitio de emplazamiento.
3) instrucciones de manipulación	Indicaciones sobre la **forma correcta de manipular** los paneles o módulos.
4) instrucciones de conexiones	Toda la información necesaria para realizar el **montaje** de manera correcta.
5) instrucciones de izaje	Indicaciones sobre **puntos de izaje, maquinaria necesaria y procedimientos** requeridos para una correcta instalación de elementos en obra.
6) instrucciones de montaje	Se recomienda el uso de una **lista de verificación de montaje** que contenga la información necesaria para realizar el montaje, criterios de verificación de la instalación, tolerancias, secuencia de montaje y toda la información que se considere necesaria para una correcta ejecución del montaje.
7) instrucciones de reparación	Recomendaciones para la **evaluación y reparación** de daños en terreno y los elementos requeridos para estas labores.
8) instrucciones de uso y cuidado	Indicaciones **para el usuario**, que contengan **información** respecto a los puntos recomendados para colgar elementos de peso considerable.
9) instrucciones particulares	Información relevante para la **ejecución de la vivienda**.
10) ensayos de materia prima	Ensayos de las **materias primas** que **conforman los elementos**.
11) manual de uso, cuidado y mantención	**Manual para el usuario,** que contenga algunos aspectos mínimos: **descripción del sistema de edificación, precauciones de uso y mantenimiento, fijaciones de muebles y similares,** colocación de protecciones metálicas en ventanas, abertura de nuevos vanos para puertas y ventanas y otros pertinentes a la solución constructiva.
12) ficha informativa	Documento que detalla como mínimo: **propietario de la vivienda industrializada tipo, profesionales competentes asociados, materialidad, superficie de la vivienda, número de pisos, recintos conformados,** procedencia del **sistema constructivo**, descripción del sistema constructivo, valor del kit o módulo, zona en la cual está dispuesto a construir, mínimo de viviendas tipo dispuesto a construir, tiempo de construcción de una vivienda y otros antecedentes atingentes.
13) memoria de elementos Industrializados	Documento que describe cómo se cumple con la exigencia de tener **al menos un 40%** de elementos o elementos industrializados y terminaciones en fábrica.
14) patrocinio empresa industrializadora	Carta de patrocinio que presenta la empresa constructora o entidad patrocinante, que declara: las regiones y provincias en que está dispuesto a construir, el mínimo de viviendas tipo dispuesto a construir y el tiempo de construcción de una vivienda.

2.1.3 Glosa N°6 – Ley N°21.516

Para facilitar el desarrollo de proyectos residenciales, se ha generado un mecanismo de abreviación del procedimiento de ingreso de viviendas, donde se define que aquellos proyectos de "vivienda tipo industrializada" aprobados por la DITEC, no requerirán cumplir con el inciso 1° del Artículo N°116 de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, ni requerirán inspecciones y/o recepciones por parte de las Direcciones de Obras Municipales, mientras tengan este carácter y sean construidas mediante subsidio del Estado. Esta indicación tiene como objetivo establecer una sola instancia de revisión, ejecutada por SERVIU o la DITEC, donde se evalúa el cumplimiento de todos los requisitos para este tipo de proyectos, evitando una doble revisión que retrasaría el proceso y no significaría una contribución real al proyecto.

En el caso del loteo y obras de urbanización, éstas si deberán ser aprobadas y recibidas por las Direcciones de Obras Municipales y demás entidades de acuerdo a la ley.

No obstante, todos los proyectos deberán ajustarse a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones y al Plan regulador respectivo.

Al momento de aprobación de la vivienda, el SERVIU deberá informar a la Dirección de Obras Municipales respectiva, el número y tipo de viviendas y las personas responsables.

2.2
Requerimientos normativos para la vivienda industrializada tipo

Debido a la inclusión de mayores instancias de control de calidad y a las mejoras en la gestión del proceso constructivo que conlleva la industrialización, su inclusión en el Plan de Emergencia Habitacional presenta la oportunidad de mejorar la calidad de las viviendas con financiamiento estatal. Debido a esto, se puso en efecto un nuevo estándar higrotérmico para viviendas industrializadas tipo, aplicable solamente a viviendas industrializadas.

Con esta acción, las viviendas industrializadas del Fondo Solidario de Elección de vivienda o del Programa de Habitabilidad Rural consideran un estándar higrotérmico superior al de viviendas de construcción tradicional y a aquellas regidas por los de los Planes de descontaminación atmosférica.

2.2.1 Estándar higrotérmico para viviendas industrializadas tipo

Las actualizaciones que presenta este estándar tienen relación con mejoras en el desempeño de la envolvente de la vivienda, considerando su comportamiento térmico (piso ventilado, muros y techumbre), la transmitancia térmica de elementos translúcidos (ventanas), aislación térmica de sobrecimiento (cuando corresponda), eliminación del riesgo de condensación superficial e intersticial, control de infiltraciones de aire y cumplimiento de caudales mínimos de ventilación.

En tanto la envolvente mejora su desempeño, otros aspectos se ven optimizados, como reducciones en el gasto energético de la vivienda y en el gasto económico asociado y, además, mayores condiciones de confort térmico y en la calidad del aire al interior.

El cumplimiento de estos estándares, debe proyectarse desde el inicio de la etapa de diseño, debido a que la incorporación de aislante térmico, membranas o artefactos debe coordinarse con el equipo de prefabricación y evaluar la factibilidad de su instalación en la planta de prefabricación o la estrategia de instalación en terreno.

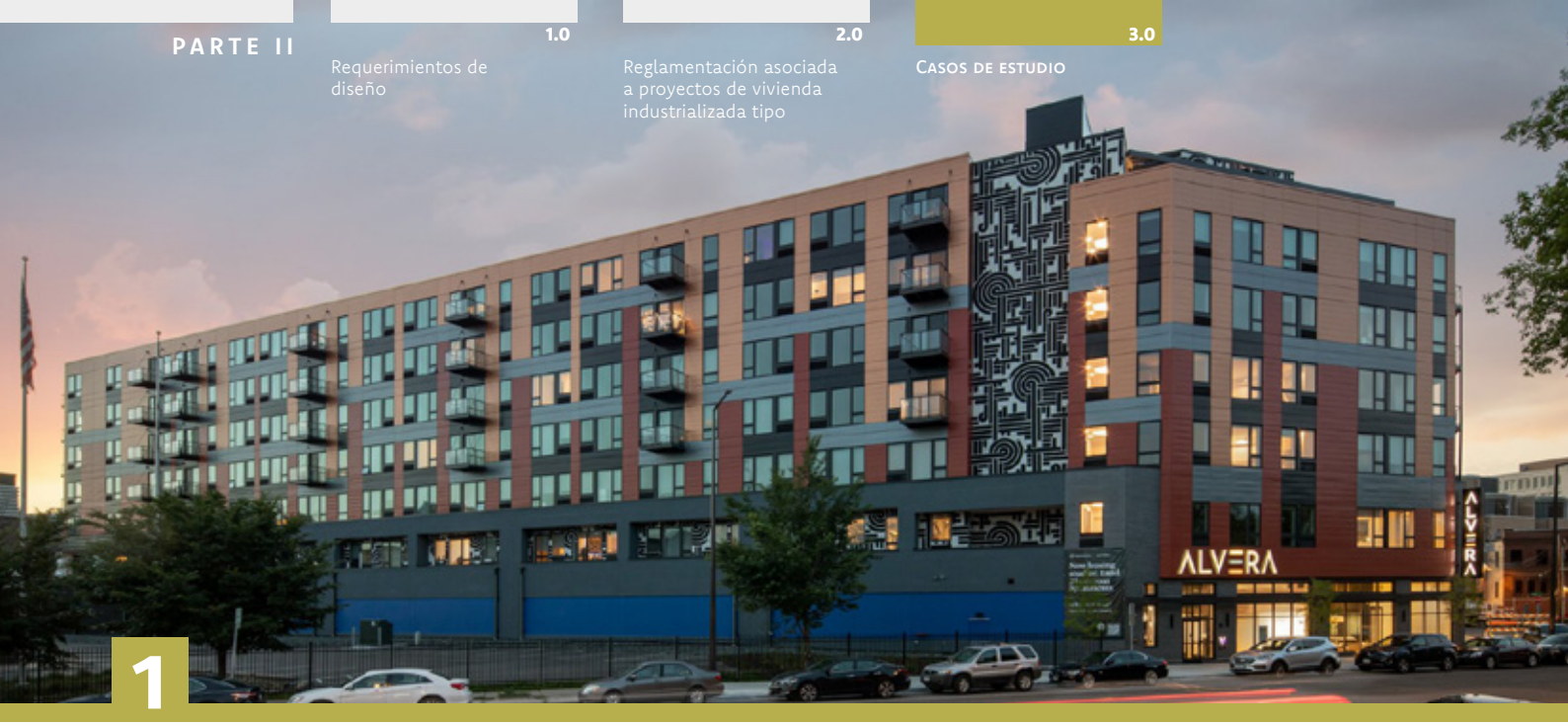
Transmitancia térmica y resistencia térmica	Define la **transmitancia térmica máxima** (Valor U) y **resistencia térmica mínima** (Rt) para la solución específica de **techumbre, muros perimetrales, piso ventilado** y **puertas opacas**, para la **zona térmica específica** de emplazamiento.
Complejo de elementos translúcidos o ventanas	Se definen **porcentajes máximos de superficie de ventana**, dependiendo de su orientación, zona térmica y transmitancia térmica.
Aislación térmica de los sobrecimientos	Se define la **resistencia mínima (Rt)** del material aislante térmico utilizado en los sobrecimientos de pisos sobre el terreno o el elemento que cumpla la **función de separar el nivel de piso terminado** de la edificación y sus **muros perimetrales del nivel de terreno.**
Condensación superficial e intersticial	Se debe acreditar que **no existe riesgo de condensación superficial e intersticial a menos de 76% de humedad relativa del ambiente interior,** para complejos de techo, muros perimetrales y pisos ventilados de las viviendas. La solución constructiva debe asegurar la salida del vapor de agua que ingrese a la solución.
Infiltraciones de aire	Se establece la clase de **infiltración máxima para la envolvente térmica** de las viviendas, excluyendo puertas y ventanas, de acuerdo a la provincia de **emplazamiento de la vivienda**. Para puertas y ventanas se establece la clase mínima de permeabilidad al aire.
Ventilación	Se definen los caudales mínimos de ventilación, **descritos en las NCh 3308 y NCh 3309.**

Figura 52: *Requisitos del estándar higrotérmico MINVU para viviendas industrializadas*

3

Casos de estudio

CASOS INTERNACIONALES



1

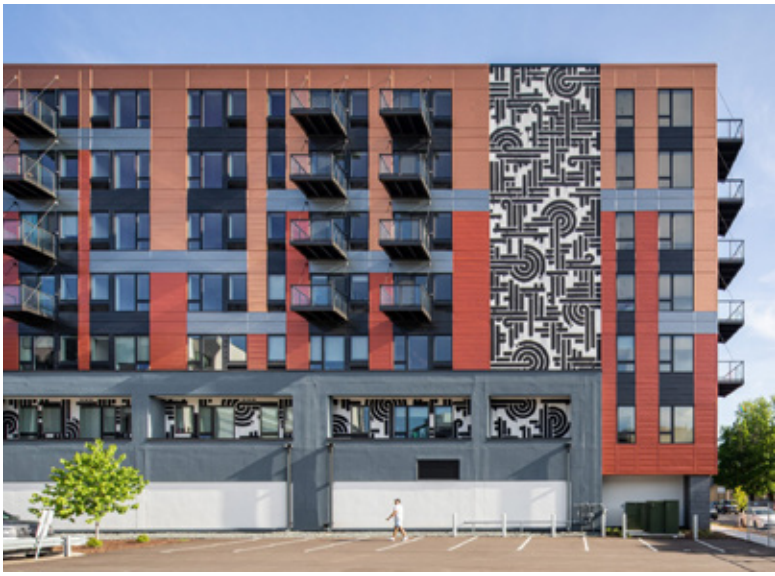
ALVERA

Descripción

Alvera es un proyecto de uso mixto que alcanza los 7 pisos de altura, con 2 pisos inferiores de hormigón y 5 pisos edificados a partir de 154 módulos de entramado ligero en madera. El edificio posee 193 unidades de vivienda de 1 y 2 dormitorios, que se encuentran en los 5 pisos superiores, mientras que los primeros tienen uso comercial y estacionamientos.

Inicialmente se había decidido construir tradicionalmente, sin embargo, debido a la estrechez del terreno no existía la posibilidad de almacenar materiales ni preparar faenas en el sitio, por lo que se evaluó edificar con elementos prefabricados, lo que significó, además, un importante ahorro en tiempo para el proyecto. La duración total del proyecto fue de 13 meses, en contraste con los 18 a 24 meses que se estima podría haber tomado edificarlo de manera tradicional.

La planificación logística consideró el uso de un lote vacío cercano para preparar un número mínimo de módulos antes de su montaje y realizar las inspecciones necesarias, lo que permitió reducir los viajes entre y hacia la planta de prefabricación.

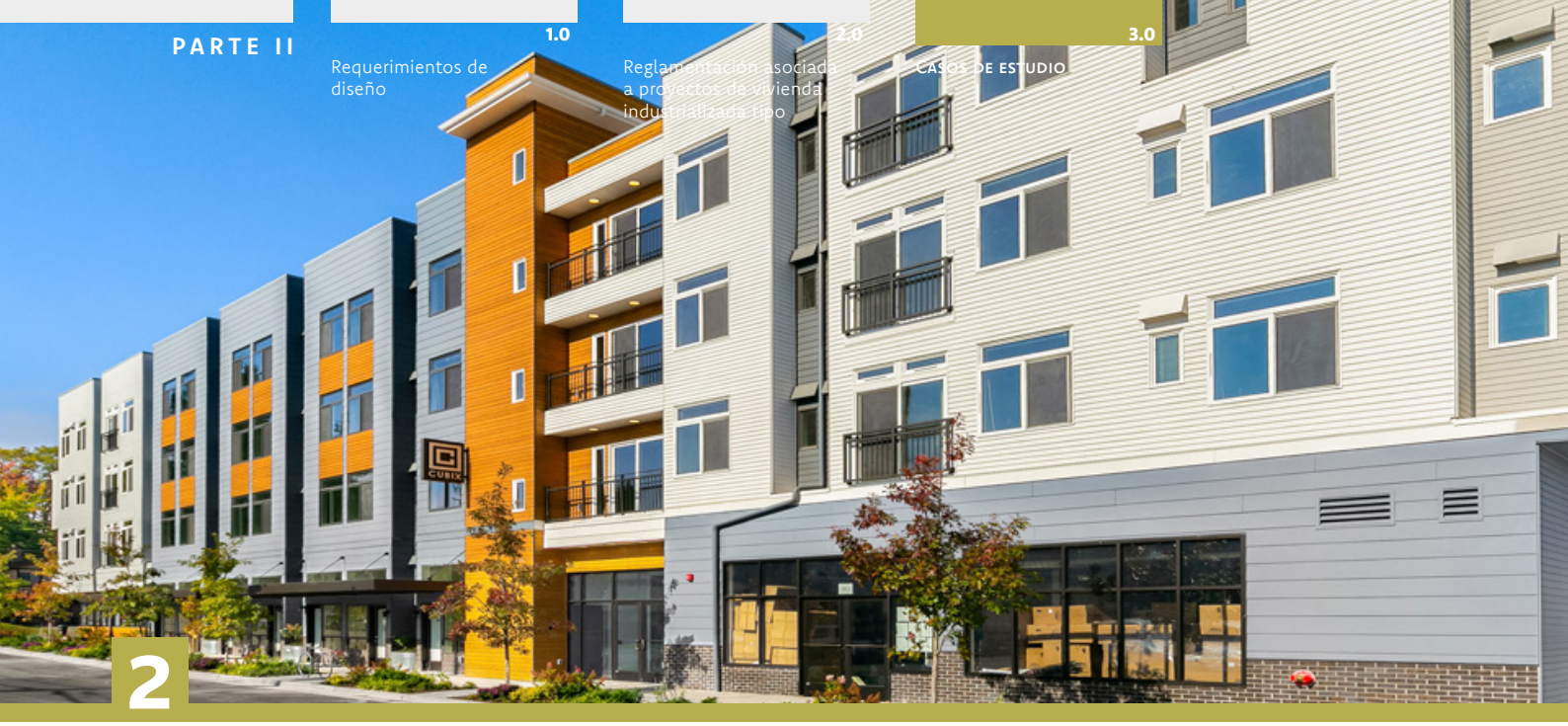


Información General

Nombre proyecto: Alvera
Ubicación: Minnesota, USA.
Destino: Mixto: Vivienda – Comercial
Año de término: 2022
Pisos: 7
Arquitectura: DJR Architecture
Prefabricación: RISE Modular
Construcción: Cannon Constructors

Antecedentes constructivos

Sistema constructivo: Entramado Ligero
Materialidad: Madera y hormigón
Tipo de elemento prefabricado: modular
Tiempo de montaje: 22 días
Tiempo de construcción total: 13 meses



2

CUBIX NORTH PARK

Descripción

El proyecto Cubix North Park corresponde a un edificio modular de uso mixto, que alcanza los 4 pisos de altura. El primer piso fue edificado en terreno y posee uso comercial, mientras que los pisos superiores corresponden a 93 unidades de micro vivienda, conformadas por 36 módulos de entramado ligero en madera. Dentro de su contexto, destaca por el valor accesible de las viviendas.

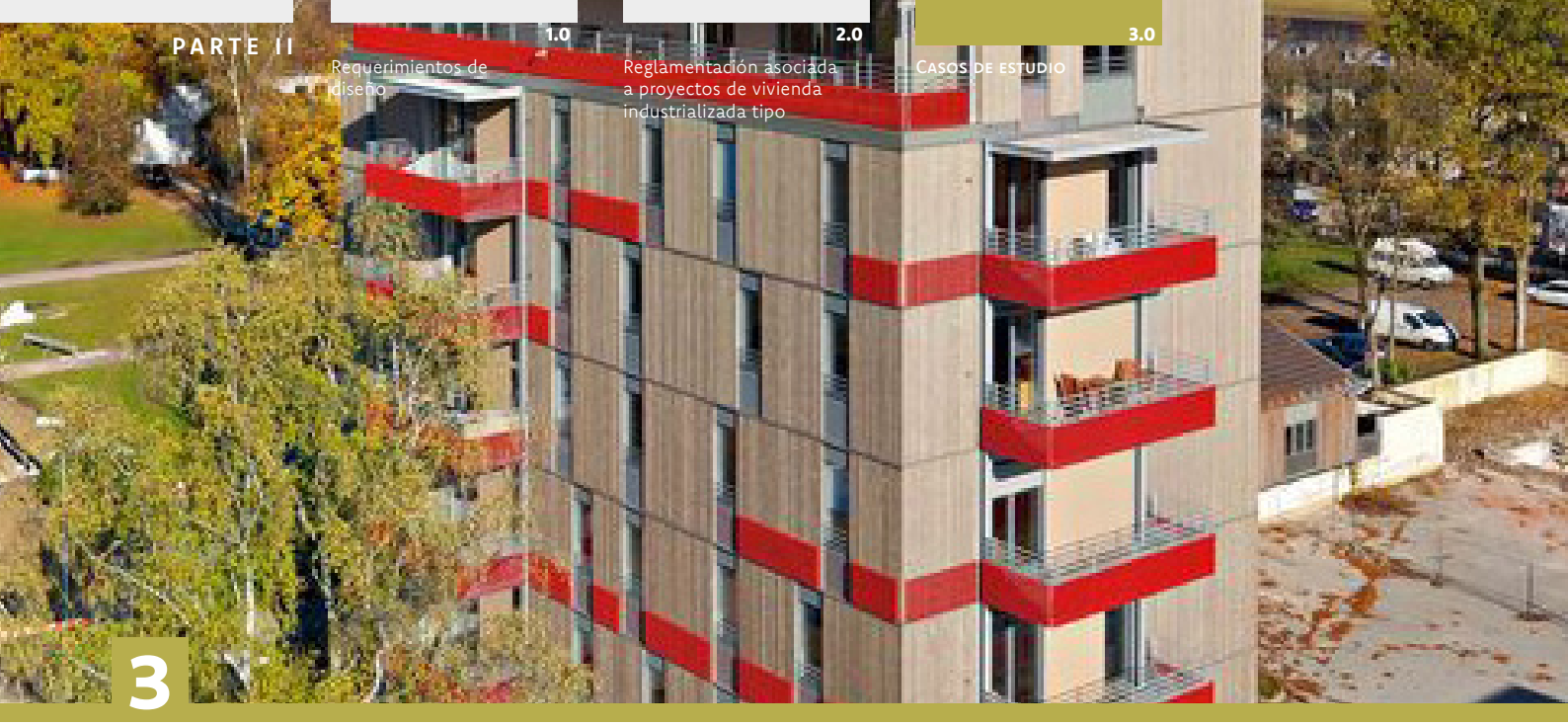
Los módulos correspondientes a las viviendas fueron ubicados paralelos al pasillo central de circulación, lo que redujo los encuentros exteriores entre unidades y permitió también reducir el número de módulos necesarios, y, de esta forma, reducir tiempos de prefabricación y costos de transporte. Por otro lado, los largos de las unidades modulares eran diferentes, lo que proporcionó movimiento a la fachada.

Información General

Nombre proyecto: Cubix North Park
Ubicación: Seattle, USA.
Destino: Mixto: Vivienda – Comercial
Año de término: 2018
Pisos: 4
Arquitectura: Jackson Main Architecture
Prefabricación: Guerdon Modular Buildings

Antecedentes constructivos

Sistema constructivo: Marco Plataforma
Materialidad: Madera – Acero y madera laminada
Tipo de elemento prefabricado: modular
Tiempo de montaje: 8 días



3

H8

Descripción

H8 es un proyecto de uso mixto de 8 pisos y 25 metros de altura, que, a excepción de las escaleras, fue edificado completamente en madera. El edificio considera dos pisos de oficina y el resto corresponden a vivienda. Los muros estructurales y no estructurales de todos los pisos, junto con la techumbre corresponden a paneles de CLT. La prefabricación de paneles considera, además, ventanas y revestimientos exteriores, lo que implica un alto grado de prefabricación. Por motivos de protección frente a incendios, las escaleras fueron prefabricadas en hormigón. La envolvente consideró altos estándares de aislación térmica y se minimizaron al máximo los puentes térmicos.

Información General

Nombre proyecto: H8
Ubicación: Bad Aibling, Alemania.
Destino: Mixto: Vivienda - Oficinas
Año de término: 2011
Pisos: 8
Arquitectura: Schankula
Prefabricación: Binderholz-Huber & Sohn GmbH & Co. KG
Construcción: B&O

Antecedentes constructivos

Sistema constructivo: CLT
Materialidad: Madera y hormigón
Tipo de elemento prefabricado: Panelizado
Tiempo de montaje: 3 semanas

4

PUUKUOKKA

Descripción

Puukuokka corresponde al primer edificio de un proyecto residencial de tres edificios. Conforma un total de 58 departamentos edificados a partir de módulos de CLT con una envolvente eficiente energéticamente. La planta está diseñada con un pasillo de circulación interior y cada departamento está conformado por un módulo húmedo contiguo al pasillo y un módulo de recintos habitables orientado hacia el exterior.

El uso de módulos de CLT permitió integrar las tuberías de climatización, agua, electricidad y ventilación en la estructura de pared del pasillo, lo que facilita el acceso para tareas de mantención y reparación, además de maximizar el espacio en cada departamento.

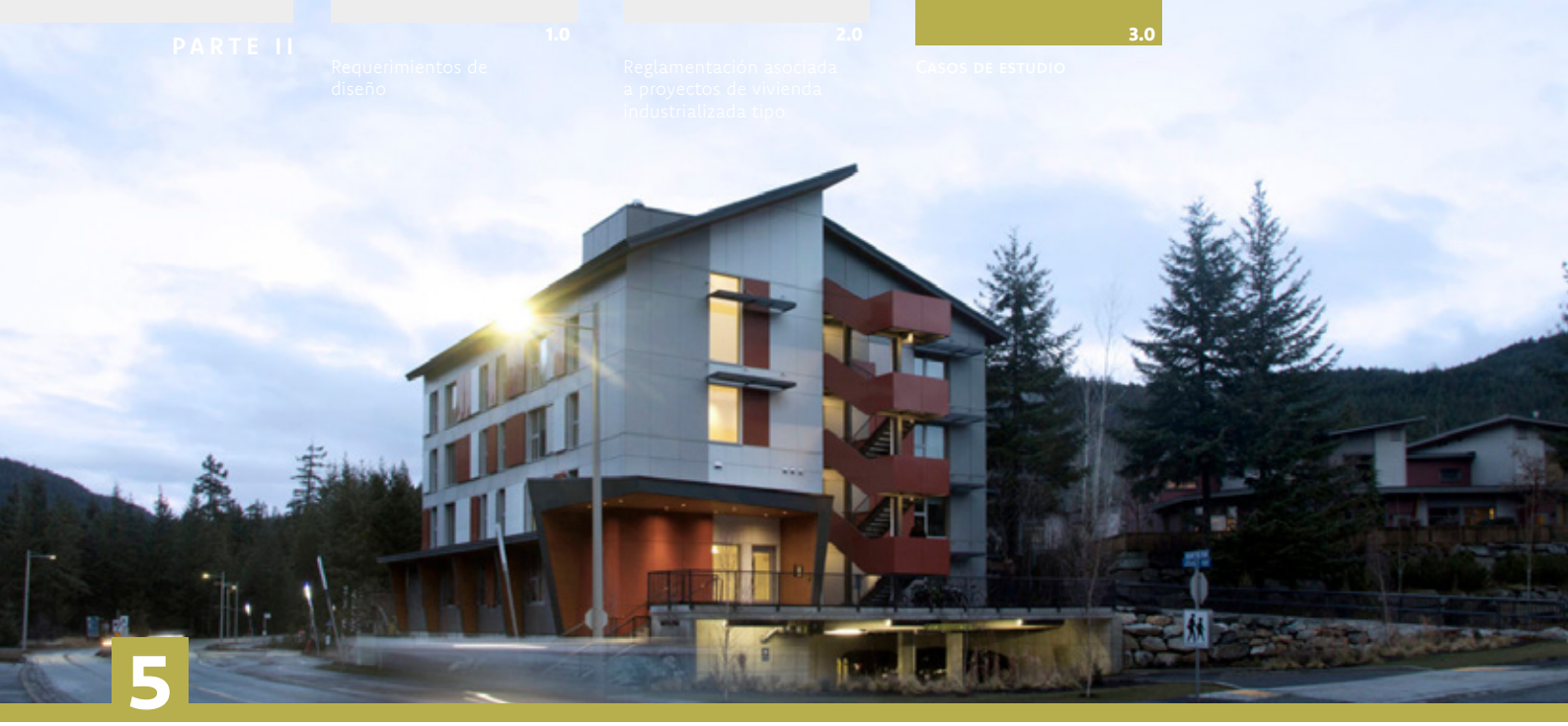
El uso de módulos de CLT permitió ejecutar la construcción en un total de 6 meses, reduciendo la exposición a las condiciones climáticas y mantener la calidad de la obra.

Información General

Nombre proyecto: Puukuokka
Ubicación: Jyväskylä, Finlandia.
Destino: Vivienda
Año de término: 2015
Pisos: 8
Arquitectura: OOPEAA
Prefabricación: Stora Enso - Lakea

Antecedentes constructivos

Sistema constructivo: CLT
Materialidad: Madera
Tipo de elemento prefabricado: Modular
Tiempo de construcción total: 6 meses



5

LEGACY WHA

Descripción

Legacy WHA es un proyecto que forma parte de la Estrategia nacional de vivienda de Canadá y busca dar solución habitacional a través del arriendo de 20 departamentos. El proyecto fue edificado a partir de paneles prefabricados de entramado ligero en madera y diseñado con el estándar Passive House, incorporado en sus soluciones constructivas panelizadas.

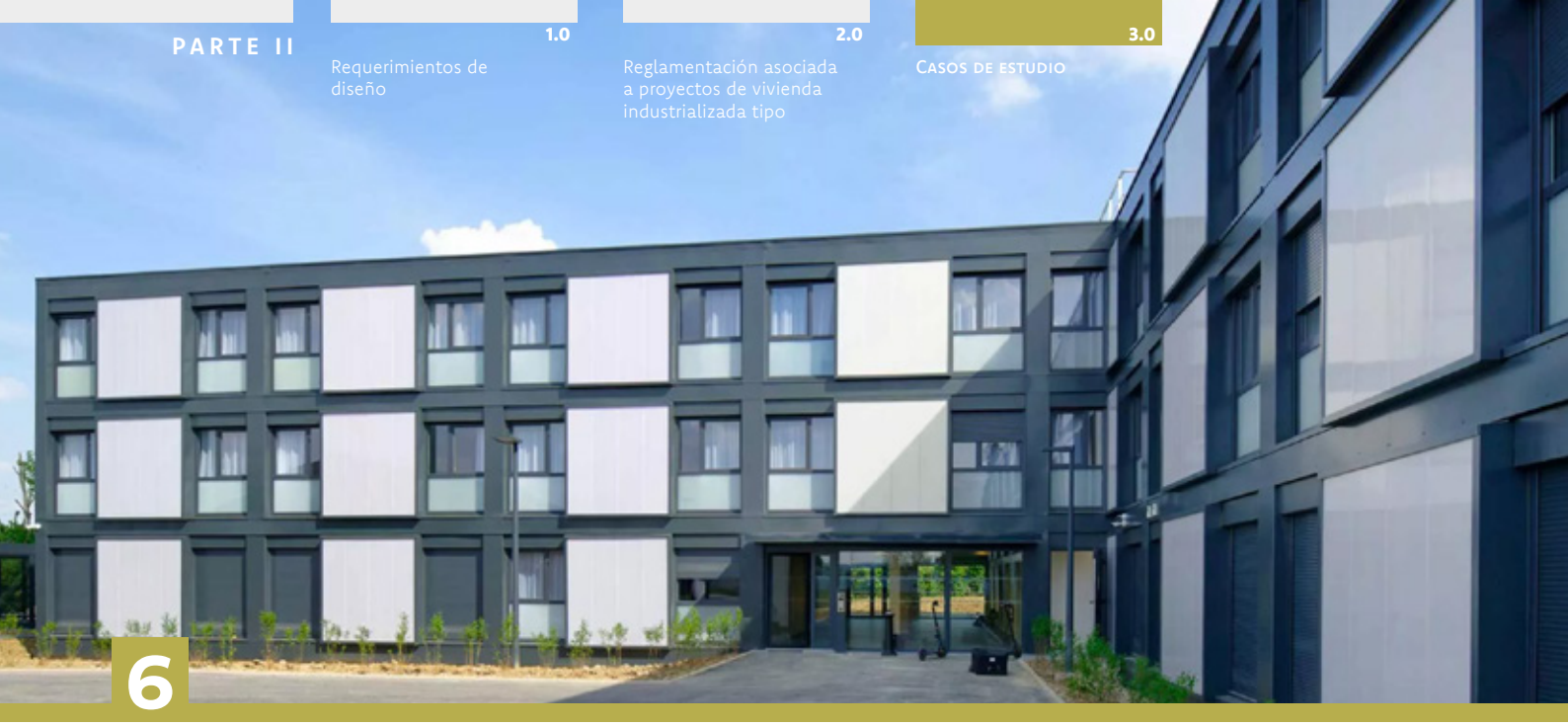
La prefabricación significó reducción de costos, incremento de la productividad y la eficiencia energética.

Información General

Nombre proyecto: Legacy WHA
Ubicación: Whistler, Canadá.
Destino: Vivienda
Año de término: 2019
Pisos: 4
Arquitectura: Integra Architecture
Prefabricación: BC Passive House

Antecedentes constructivos

Sistema constructivo: Marco plataforma
Materialidad: Madera
Tipo de elemento prefabricado: Panelizado
Tiempo de montaje: 14 días



6

Residencia social Coallia Antony

Descripción

El proyecto corresponde a una residencia social de 150 viviendas que permite dar solución habitacional a personas vulnerables y aisladas con recursos. Una de las condiciones iniciales establecidas para el proyecto era el requerimiento de generar un diseño que pudiera ser desmontable, lo que propició el desarrollo del proyecto a partir de 169 módulos prefabricados de madera, que desde un inicio fueron diseñados con este propósito y con la posibilidad de generar nuevas configuraciones en su segunda vida.

A partir de la experiencia previa de la empresa prefabricadora con el Refugio para migrantes desmontable en Ivry-sur-Seine, se desarrollaron módulos que contenían las instalaciones eléctricas y sanitarias para los diferentes recintos y pinturas de fachada.

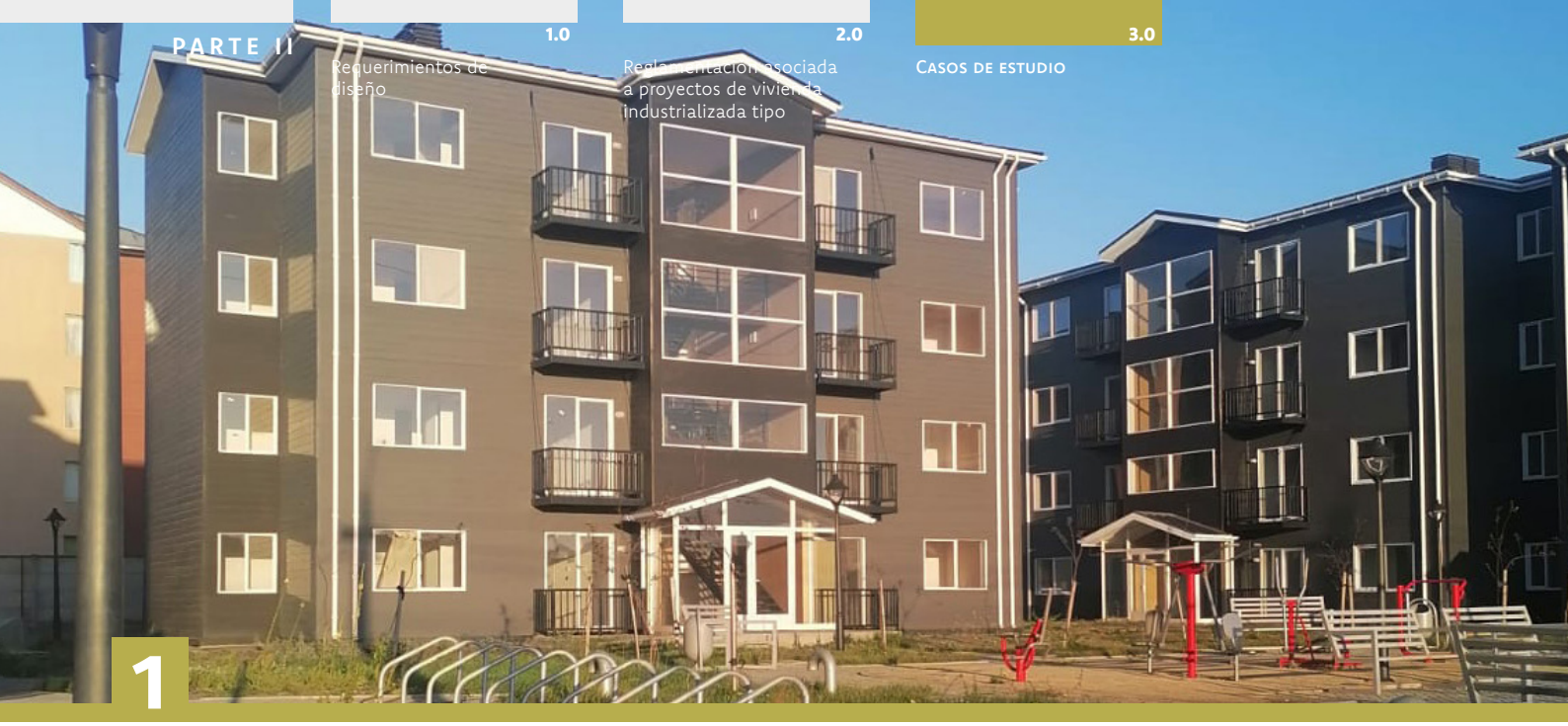
Información General

Nombre proyecto: Residencia social Coallia Antony
Ubicación: Antony, Francia.
Destino: Vivienda
Año de término: 2022
Pisos: 3
Arquitectura: Moon Architecture
Prefabricación: Ossabois

Antecedentes constructivos

Sistema constructivo: Marco plataforma
Materialidad: Madera
Tipo de elemento prefabricado: Modular
Tiempo de montaje: 8 semanas
Tiempo de construcción total: 4 meses

CASOS NACIONALES



1

HORIZONTE DEL PACÍFICO

Descripción

Horizonte del Pacífico es un conjunto residencial compuesto por 5 edificios, ubicado en la ciudad de Concepción. Posee un total de 80 departamentos y cada edificio alcanza los 4 pisos de altura, edificados en base a paneles de entramado ligero con el sistema marco plataforma. La empresa E2E estuvo a cargo de la modelación, diseño de industrialización, suministros de estructura y montaje del edificio.

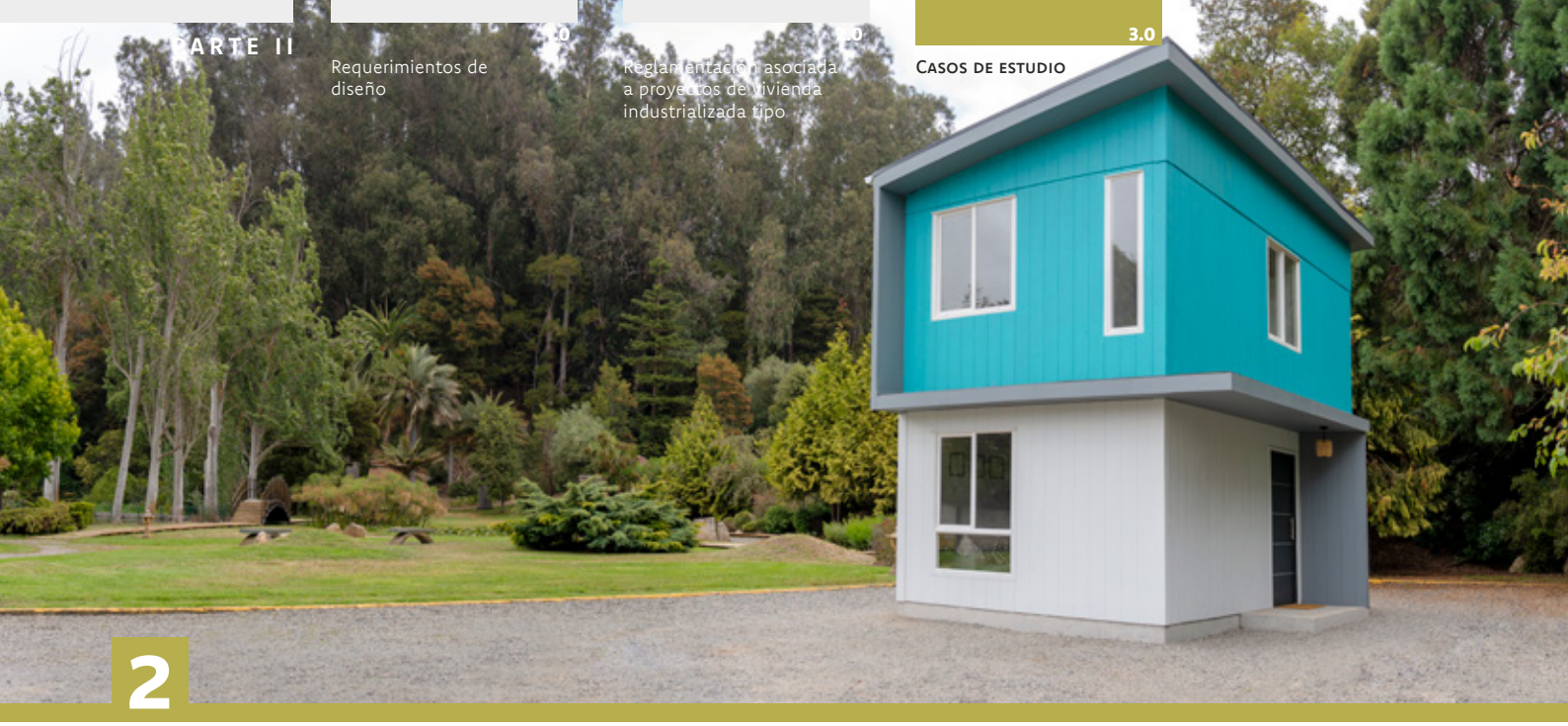
Como parte de las estrategias para dar soluciones habitacionales, fue adquirido por el Estado de Chile.

Información General

Nombre proyecto: Horizonte del Pacífico
Ubicación: San Pedro de la Paz, Región del Bío Bío.
Destino: Vivienda
Año de término: 2022
Pisos: 4
Arquitectura: Punto Cero
Prefabricación: E2E - Patagual

Antecedentes constructivos

Sistema constructivo: Marco plataforma
Materialidad: Madera



2

CASA DITEC-E2E

Descripción

El proyecto corresponde a una vivienda tipo para el Fondo Solidario de elección de vivienda (DS49), desarrollada en conjunto por la DITEC y la empresa E2E, lo que permitió abordar el desafío íntegramente, considerando los requerimientos normativos como también las consideraciones asociadas a la prefabricación. Debido a su condición de vivienda tipo, no posee un emplazamiento fijo, sino que puede ser emplazada en diferentes sectores del país donde cumple con los requerimientos térmicos. La vivienda base tiene 50.9m² edificados a partir de 22 paneles y su diseño presenta un proyecto para su ampliación. La prefabricación de sus elementos puede ser realizada en 1 día y su montaje en 3 días con un equipo de 4 personas y un supervisor.

Información General

Nombre proyecto: Casa DITEC-E2E
Ubicación: -
Destino: Vivienda
Año de término: 2022
Pisos: 2
Arquitectura: División de Estudios y Fomento Habitacional (DITEC) del Minvu
Prefabricación: E2E

Antecedentes constructivos

Sistema constructivo: Marco plataforma
Materialidad: Madera
Tipo de elemento prefabricado: Panelizado
Tiempo de montaje: 3 días

Conclusiones y recomendaciones

Los desafíos que enfrenta el país son complejos y requieren **soluciones interdisciplinarias e integrales**, que contemplen las diferentes dimensiones de la problemática. Se ha evidenciado que no basta con que un solo actor impulse el desarrollo para ver resultados concretos, sino que es necesario establecer alianzas estratégicas que permitan enfrentar los desafíos desde diversos ángulos. La cooperación entre el estado, la industria y la academia puede ser beneficiosa para abordar el desafío, a partir de las propuestas y experiencia de cada parte.

A continuación, se presentan recomendaciones para avanzar hacia el desarrollo de proyectos industrializados:

- Es fundamental mantener una **proyección hacia el futuro**, con vistas hacia la innovación y la **colaboración**, y así, impulsar la industria hacia un futuro más eficiente, sostenible y con mejoras en la calidad de los productos. La consideración y actualización constante respecto a avances tecnológicos en el mundo de la prefabricación, la integración de nuevos contratos de trabajo, la participación temprana, la digitalización, el uso de DfMA y BIM y la comunicación continua son aspectos clave que deben ser incorporados para generar un desarrollo orgánico de los procesos.

- La **creación de alianzas** entre entidades de las diferentes áreas de la construcción industrializada es fundamental para generar soluciones integrales, que aborden la cadena productiva completa, para permitir la optimización de procesos y abarcar el proyecto de manera sistémica, considerando la complejidad de los procesos y la experiencia que puede aportar cada parte. La innovación puede involucrar riesgos y en la medida en que más entidades se involucran y toman responsabilidad, **los riesgos se comparten**, lo que propicia la resiliencia ante imprevistos durante el proceso constructivo, especialmente cuando se incorporan innovaciones al proceso.

- **Considerar la perspectiva de todos los actores** es fundamental para garantizar el éxito y la eficacia de este proceso. Integrar las visiones y experiencias de todos los actores, desde equipos de diseño y prefabricadoras, hasta constructores y usuarios finales, no solo fomenta la innovación, sino también asegura la viabilidad práctica y la alineación con las necesidades reales del mercado. Esta **colaboración holística** permite mejoras en la calidad y la eficiencia de los proyectos y además impulsa un cambio positivo en la industria hacia soluciones más sostenibles y centradas en las necesidades de las comunidades.

- La **participación temprana** e i**nteracción entre participantes** es fundamental para el desarrollo exitoso de proyectos industrializados. Se destaca la necesidad de propiciar un entorno de trabajo colaborativo a través de la implementación de **nuevos contratos de trabajo**, que aborden la participación temprana de colaboradores y establezcan cada uno de los roles, responsabilidades y

alcances en las labores de cada parte, además del tipo de vínculo que se establece entre colaboradores.

- **Los tipos de contrato deben actualizarse**, con el fin de propiciar y asegurar el cumplimiento de labores en las etapas correspondientes, para llevar un proceso de acuerdo a lo planificado. Continuar con los tipos de contrato tradicionales no permitiría asegurar en todos los casos el cumplimiento del tipo de relación que se espera entre los colaboradores del equipo ni el cumplimiento de labores en el momento correspondiente, por lo tanto, es necesario hacer transformaciones en las relaciones contractuales.

- Tomar **experiencias conocidas y exitosas de referencia** permite mirar en perspectiva posibles soluciones a los problemas actuales de la construcción. La **transferencia tecnológica desde la industria manufacturera**, como la automatización y optimización de procesos, la precisión en la ejecución, la aplicación de estándares de control de calidad, el uso de herramientas de planificación y gestión y la adopción de tecnología avanzada podría impulsar **mejoras en la eficiencia** del proceso constructivo, como se ha visto en otras industrias. La prefabricación puede considerar estos conocimientos y generar adaptaciones en busca de avances en la construcción.

- La construcción industrializada se vincula directamente con el **desarrollo tecnológico**. Especialmente durante la etapa de prefabricación, que puede involucrar maquinaria con diferentes grados de tecnología, desde herramientas de uso manual hasta robots de construcción automatizada. Ante esto, supone un constante cambio y actualización de las condiciones en que se desarrolla y es indispensable que los desarrolladores presten atención a las tecnologías disponibles para el desarrollo de procesos.

- Es primordial la **implementación de estrategias de mejora continua** durante todas las etapas y avanzar en la **optimización de procesos**, que permita incrementar la eficiencia en cada nuevo proyecto que se desarrolle. Por otro lado, permitiría potenciar las ventajas de la industrialización, mejorar la calidad de productos, generar soluciones más sustentables e incluso reducir costos.

- Implementar **protocolos de lecciones aprendidas** en cada proyecto, permite reutilizar estrategias positivas y detectar aspectos que presenten debilidades y que puedan ser corregidos en cada nueva experiencia.

- Es fundamental el rol del coordinador de proyecto, quien debe propiciar la participación e interacción de todos los colaboradores y evitar la fragmentación de labores, que puede ser perjudicial para este tipo de proyectos. La generación de **instancias de colaboración** beneficia tanto el proceso, como los resultados de cada parte por separado, junto al resultado final. El uso de metodología BIM debe considerar una definición clara de los roles del proyecto.

- **Teniendo en consideración los desafíos que presenta el contexto nacional**, se espera a futuro un crecimiento de la industria, que permita atender con mayor éxito los requerimientos habitacionales del país. La generación de más alternativas para la producción de elementos prefabricados y alianzas que permitan su aprovechamiento sería crucial para colaborar en la solución del problema habitacional. Por otro lado, **la evolución de áreas habilitantes para la construcción industrializada**, como el desarrollo de solu-

ciones constructivas, materiales, conectores o sistemas de transporte y montaje también constituyen ámbitos de crecimiento que es necesario reforzar.

- **La incorporación de tecnología requiere también la formación de profesionales y mano de obra calificada** para llevar a cabo los procesos de manera óptima, por lo tanto, es necesario fortalecer estas capacidades desde su formación profesional. El uso de sistemas automatizados, softwares especializados y maquinaria robótica debe considerar la instrucción de los responsables de su operación, para así obtener los resultados esperados.

- No basta solamente con la adquisición de maquinaria de alta tecnología, sino que debe saber optimizarse su uso. En este aspecto, la vinculación con la academia es fundamental para transmitir las necesidades de la industria y potenciar los resultados a través del aprovechamiento de mallas curriculares proyectadas hacia el desarrollo tecnológico y la digitalización de procesos.

- El cambio de paradigma puede resultar muy beneficioso, sin embargo, implica **asumir riesgos** en el proceso, con el fin de **derribar las barreras culturales** y las estructuras tradicionales de trabajo. Este esfuerzo debe realizarse y puede ser compartido si así se proyecta, a través de nuevas formas de trabajo plasmadas en nuevos tipos de contratos.

- **Un aspecto relevante en la construcción industrializada es la escalabilidad**, que debe proyectarse en conjunto con mejoras en la calidad, propiciando la construcción de edificaciones con adecuados **estándares de calidad** y al mismo tiempo, con una evaluación de costos que mantenga los niveles de eficiencia y de optimización del proceso.

De acuerdo a lo expuesto en esta guía, la etapa de diseño considera una extensión de tiempo, en comparación con un proceso tradicional, donde se considera un desarrollo de proyecto más acabado y la anticipación de problemáticas que usualmente se encuentran en obra. Esta diferencia puede ser vista como una **oportunidad** de resolver inconvenientes tempranamente y generar productos de mayor calidad, para aprovechar las ventajas de esta diferencia.

Los casos de estudio presentados corresponden a un fragmento de las experiencias internacionales que entregan información relevante para el desarrollo de proyectos en Chile, rescatando **lecciones aprendidas** y análisis de aspectos positivos que pueden ser replicados o adaptados al medio local. A partir de estos casos se promueve la búsqueda de experiencias que hayan generado conocimiento respecto a temas de interés particular para cada proyecto y que puedan dar lineamientos para el proceso.

A partir de esta y otras iniciativas, se espera una transformación de la manera en que se concibe la construcción hoy en Chile, hacia una estructura organizacional más integrada y colaborativa entre participantes, que promueva la interacción y cooperación y permita dar respuesta a las dificultades y desafíos que enfrenta hoy el país. Se espera que esta integración fomente un entorno de trabajo más cooperativo, donde las ideas puedan intercambiarse con facilidad, se optimicen los recursos disponibles, se generen soluciones más eficientes y sostenibles, y se enfrenten las dificultades de manera más efectiva, abordando los desafíos del acceso a la vivienda con un enfoque más holístico.

El cambio de paradigma hacia la construcción industrializada en madera presenta oportunidades significativas. El uso de la madera como material principal para la construcción ofrece ventajas en términos de sostenibilidad, ya que

es un recurso renovable y tiene una menor huella de carbono en comparación con otros materiales de construcción. Esto alinea la industria de la construcción con los objetivos de cuidado medioambiental y desarrollo sustentable, aspectos cada vez más importantes en el contexto global.

Además, el potencial de la madera para la construcción en altura abre nuevas posibilidades para abordar la demanda de viviendas de manera eficiente y sostenible. La construcción en altura con madera, utilizando altos estándares de sustentabilidad, representa una oportunidad para desarrollar edificaciones resistentes, seguras y respetuosas con el medioambiente.

Finalmente, este cambio de paradigma no solo implica una transformación en los métodos de construcción, sino que también abre la puerta a un enfoque más consciente y responsable con el medioambiente, aprovechando las características únicas de la madera para construir un futuro más sostenible para Chile.

ANEXOS

ANEXOS

1
Vivienda Industrializada: Programas de vivienda con financiamiento estatal

Actualmente en Chile la reglamentación asociada a industrialización se aplica en dos programas de vivienda: Fondo solidario de elección de vivienda (regulado por el D.S. N°49) y el Programa de habitabilidad rural (regulado por el D.S. N°10).

Todos los proyectos de vivienda industrializada están sujetos a los requerimientos de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, instrumentos de planificación territorial, ordenanzas locales, normas técnicas, requisitos de acreditación de resistencia al fuego, aislación acústica y térmica y todas las reglamentaciones asociadas a la construcción en Chile.

Cada programa tiene requerimientos específicos asociados a los objetivos de cada uno, junto con financiamiento diferenciado para cubrir diferentes necesidades.

El diseño de proyectos asociados a ambos programas, responde a los requerimientos establecidos en tres documentos:

- **Cuadro normativo y tabla de usos mínimos para el mobiliario:** Establece los estándares arquitectónicos mínimos para el diseño de los proyectos. (esquema)

- **Itemizado técnico de construcción nacional:** Determina los requisitos mínimos que deben cumplir los proyectos habitacionales, según el tipo y zona geográfica en que se ubiquen. Define los requisitos para la presentación de proyectos, requisitos técnicos mínimos para las obras preliminares, obra gruesa, terminaciones, instalaciones, obras exteriores, urbanización, requisitos adicionales para viviendas inclusivas, estándar técnico en la adquisición de viviendas nuevas y recomendaciones.

- **Itemizado técnico de construcción regional:** Complementa y precisa las exigencias mínimas determinadas por el Itemizado técnico de construcción nacional. Entrega lineamientos respecto a la pertinencia local de cada propuesta y permite resguardar las particularidades de cada Región.

Cada programa presenta cuadros normativos e itemizados específicos, de acuerdo a sus objetivos y alcances.

Junto con los documentos antes mencionado, todos los proyectos de vivienda asociados a un subsidio, deben cumplir como mínimo, con los estándares higrotérmicos, que tienen como objetivo entregar viviendas con adecuados estándares de habitabilidad y un buen desempeño térmico.

1.1 Fondo solidario de elección de vivienda. Regulado por el D.S. N°49

Programa orientado a familias que no son dueñas de una vivienda y viven en una situación de vulnerabilidad social, preferentemente a familias que pertenezcan al 40% más vulnerable. Este subsidio permite la compra de viviendas sin deuda hipotecaria y entrega montos diferenciados de acuerdo a las características del grupo familiar y el sitio de emplazamiento de la vivienda.

La postulación se puede realizar en dos modalidades:

- Individual, para la adquisición de una vivienda construida nueva o usada, la construcción de una vivienda en sitio

- Colectiva: para la construcción en nuevos terrenos o megaproyecto o en la modalidad de construcción de viviendas en sitio propio, densificación predial o en pequeño condominio. Esta postulación deberá vincularse a un proyecto habitacional y a una entidad patrocinante.

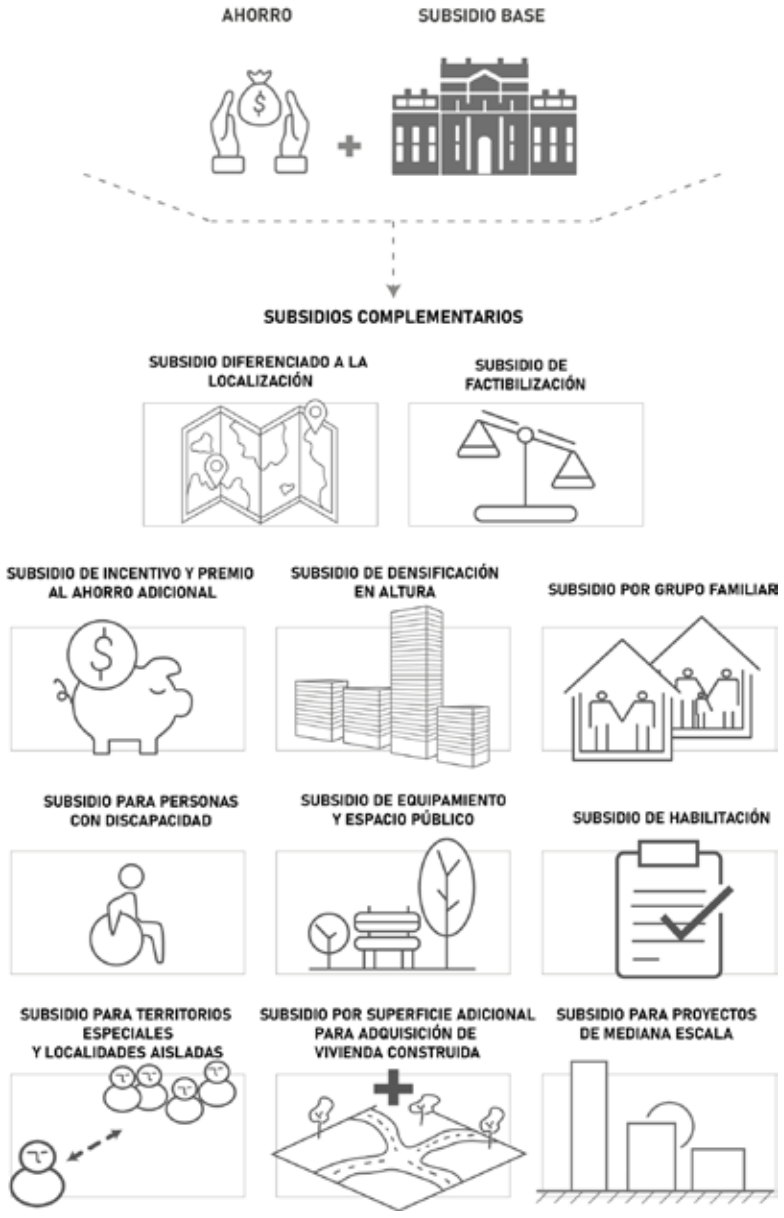


Figura 82: *Financiamiento Fondo Solidario de Elección de Vivienda DS 49*

Los proyectos de construcción en nuevos terrenos, incluidos los megaproyectos, requerirán para el conjunto habitacional y la urbanización un solo permiso de edificación y/o loteo y deberán tener un mínimo de 10 viviendas y un máximo de 160, considerando equipamiento y áreas verdes.

Los proyectos de densificación predial consideran el desarrollo de uno o más proyectos en terrenos con una o más viviendas existentes y pueden considerar la rehabilitación total o parcial de la o las viviendas.

Los proyectos de construcción en sitio propio pueden considerar infraestructura y/o edificaciones existentes en el terreno en que se desarrolle.

Los proyectos de pequeño condominio consideran la edificación de 2 a 9 soluciones habitacionales y opcionalmente equipamiento. Puede incorporar la recuperación o rehabilitación de infraestructura y/o edificaciones existentes en el terreno en que se desarrolle el proyecto.

Respecto al financiamiento, el programa considera un ahorro mínimo, un subsidio base y subsidios complementarios. Los montos del subsidio base varían en función de la calificación socioeconómica y la tipología de aplicación, mientras que los montos de subsidios complementarios dependen de la calificación socioeconómica, las características del grupo familiar y del sitio de emplazamiento.

1.2 Programa de habitabilidad rural. Regulado por el D.S. N°10

Programa orientado a familias que necesitan una solución habitacional y viven en zonas de hasta 5.000 habitantes. Se caracteriza por reconocer las particularidades culturales, geográficas y productivas de los territorios y de quienes residen en ellos. Este subsidio permite la construcción de una vivienda en el terreno donde vive la familia interesada y el monto del subsidio puede variar dependiendo de la calificación socioeconómica de la familia y el grado de aislamiento geográfico de la localidad que habita.

Para el financiamiento de los proyectos se considera un ahorro mínimo, un subsidio base y subsidios complementarios. El monto del subsidio base puede variar dependiendo de la tipología de aplicación y la calificación socioeconómica de las familias, al igual que el ahorro mínimo requerido.

Para la proyección de ampliaciones, el decreto define la superficie mínima a construir, según el tipo de recinto considerado en la ampliación.

Debido a la diversidad de condiciones presentes en las distintas localidades, el costo de la construcción puede variar a lo largo del país. Para ajustar los montos entregados de subsidio base, se establece una tabla con factor multiplicador, definido por comuna, modalidad, tipología de proyecto, categoría de aislamiento y calificación socioeconómica. A través de esta tabla se ajustan los valores de forma diferenciada.

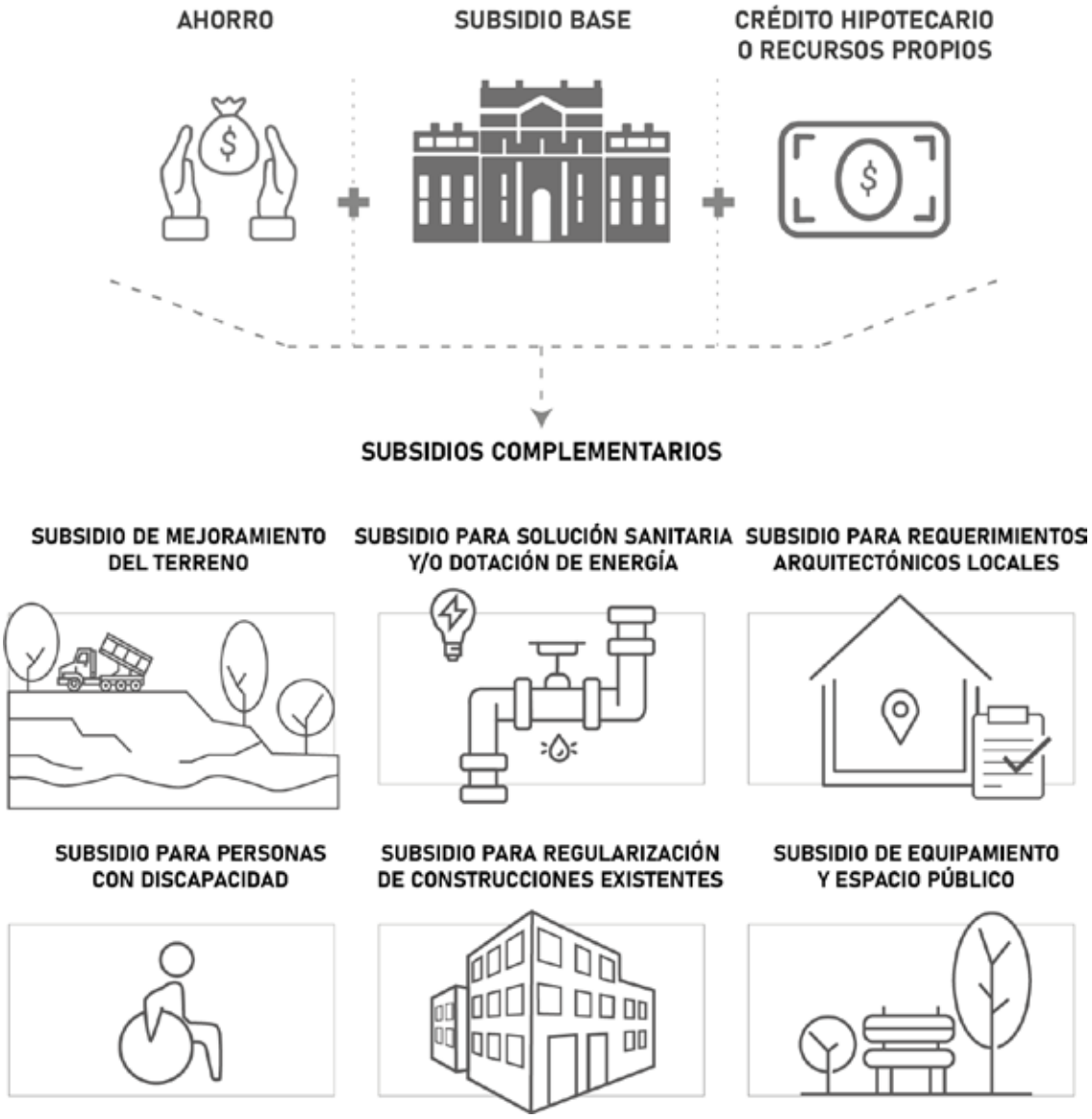


Figura 83: *Financiamiento Programa de Habitabilidad Rural DS10*

2
PRESERVACIÓN Y DURABILIDAD DE LA MADERA

La especie de madera más utilizada en la industria de la Construcción en Chile es el Pino Radiata, debido a su disponibilidad. El Pino Radiata está clasificado en la Norma Chilena NCh789/1 Maderas-Parte 1: Clasificación de maderas comerciales por su durabilidad natural, en la quinta categoría como no durable, lo que significa que su durabilidad natural expuesta a organismos de deterioro, como hongos de pudrición e insectos xilófagos, es menor a 5 años.

La Ley y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), en su artículo 5.6.8, establece que, al usar madera en la construcción, si ésta pertenece al Grupo 5 debe haber sido preservada según lo que estipula la Norma Chilena 819. La Norma de impregnación de madera en Chile (NCh819), establece el riesgo al cual se encontrará expuesta la madera dependiendo de donde se vaya a utilizar en una construcción. En función de ello, se especifican los preservantes que se pueden utilizar y los requisitos de retención y penetración de ellos en la madera.

Los productos químicos a ser utilizados en la preservación deben estar especificados en la NCh 819 y deben contar con registro del Servicio Agrícola y Ganadero.

La retención es la cantidad de activos del preservante que debe ingresar y permanecer en la madera, según el uso que ésta tendrá en la construcción. Se mide en kilos de preservante por metro cúbico de madera y estos valores se especifican en la NCh819 para cada producto listado.

La penetración es la distancia de ingreso del preservante al interior de la madera y se mide en milímetros.

Cabe mencionar que la madera tratada puede ser usada en todo tipo de condiciones: enterrada en el suelo, al exterior sobre el nivel del suelo, en contacto con agua dulce y salada, en tanto se use el producto adecuado y se siguan las especificaciones de la NCh 819.

El tratamiento de madera con un preservante es un proceso industrial y se realiza en una planta impregnadora. Para tratamientos con preservantes hidrosolubles se utilizan autoclaves de sección circular, con bombas de vacío y presión; para productos en base a solventes orgánicos los autoclaves son de sección cuadrada o circular, con bomba de vacío involucrada.

La OGUC determina además que la madera preservada debe ser usada seca, con un contenido de humedad de equilibrio de la zona en uso.

Zona	**Contenido de humedad (%)**	
	Mínimo %	**Máximo %**
Norte litoral	11	18
Norte desértica	5	9
Norte valle transversal	11	16
Central litoral	11	17
Central interior	9	20
Sur litoral	12	22
Sur interior	12	22
Sur extremo	11	23

3
LOD's

A modo de estandarizar los alcances del modelo BIM de un proyecto, se establecieron los LOD, un esquema que define niveles de detallamiento para modelos de coordinación de proyectos entre disciplinas.

Existen diversas definiciones para referirse a los niveles de detalle que puede alcanzar un modelo. Mientras en Reino Unido se utiliza el término LOD para referirse a *Level of detail* (Nivel de detalle) o *Level of definition* (Nivel de definición), en Estados Unidos se concibe el LOD como *Level of development* (Nivel de desarrollo). Por otro lado, se utiliza el término LOI (*Level of information*) para describir el grado de profundidad que alcanza la información contenida en un modelo, que puede ser geométrica o no geométrica, sin embargo, no existe un estándar que contemple este término dentro de la metodología de coordinación.

De acuerdo a BIM Forum[34], el LOD es el grado en que se ha detallado la geometría y la información asociada a un elemento y define hasta qué punto es posible confiar en la información contenida en el modelo.

En el marco chileno, el Estándar BIM para Proyectos Públicos[35] desarrollado por Planbim de Corfo, toma como referencia el estándar desarrollado por *The American Institute of Architects* (G202-2013 - *Project Building Information Modeling Protocol Form*) y el desarrollado por BIMForum USA (*Level of Development Specification*) y propone 6 Niveles de información. A continuación, se detallan los LOD presentados y la definición de AIA y BIM Forum en 2022, en el suplemento actualizado de especificaciones[36]:

LOD 100
El elemento del modelo puede estar representado gráficamente en el modelo con un símbolo u otra representación genérica, pero no cumple con los requisitos para el LOD 200. La información relacionada con el elemento del modelo (por ejemplo, costo por pie cuadrado, tonelaje de HVAC, etc.) puede derivarse de otros elementos del Modelo.

LOD 200
El elemento del modelo se representa de manera genérica y gráfica dentro del modelo con cantidades aproximadas, tamaño, forma, ubicación y orientación.

LOD 300
El elemento del modelo, tal como está diseñado, se representa gráficamente dentro del modelo de tal manera que se pueden medir sus cantidades, tamaño, forma, ubicación y orientación.

LOD 350
El elemento del modelo, tal como está diseñado, se representa gráficamente dentro del modelo de manera que se pueden medir sus cantidades, tamaño, forma, ubicación, orientación y sus interfaces con elementos del modelo adyacentes o dependientes.

LOD 400

El elemento del modelo se representa gráficamente dentro del modelo con suficiente detalle para la fabricación, ensamblaje e instalación.

LOD 500

El elemento del modelo es una representación gráfica de una condición existente o tal como se construyó, desarrollada mediante una combinación de observación, verificación en campo o interpolación. El nivel de precisión debe ser señalado o adjuntado al elemento del modelo.

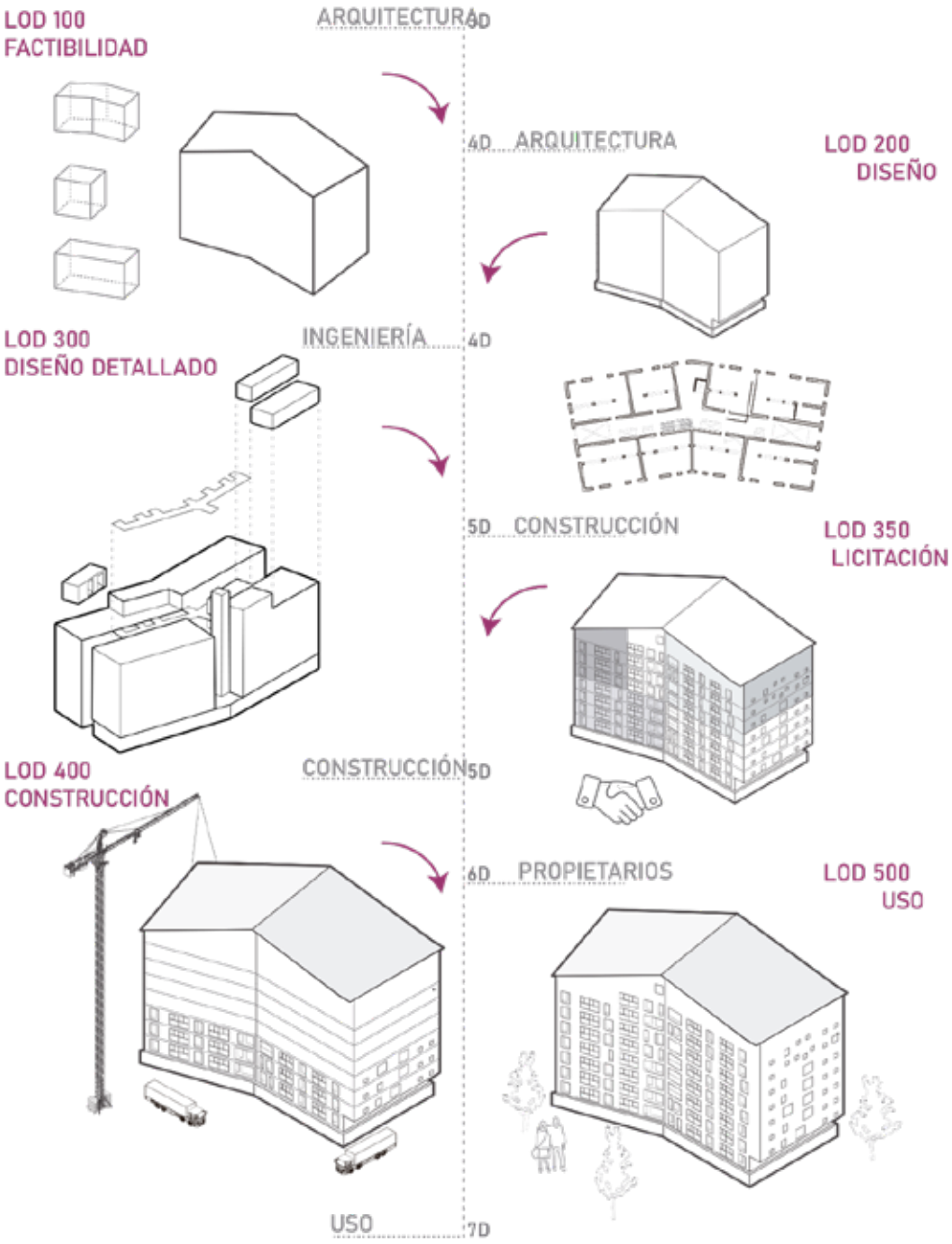


Figura 84: *Niveles de desarrollo (LOD) en BIM*

Bibliografía

Allen, Edward, y Patrick Rand. 2016. *Architectural detailing: function, constructibility, aesthetics*. Third edition. Hoboken, New Jersey: Wiley.

ARUP. 2016. «The circular economy in the built environment».

2019. «Rethinking Timber Buildings».

Banco Mundial. 2020. «La construcción de viviendas de madera en Chile. Un pilar para el desarrollo sostenible y la agenda de reactivación».

Bari, Nor Azmi Ahmad, Nor Ainah Abdullah, Rosnah Yusuff, Napsiah Ismail, y Aini Jaapar. 2012. «Environmental Awareness and Benefits of Industrialized Building Systems (IBS)». Procedia - Social and Behavioral Sciences 50: 392-404. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.08.044.

Basco, Ana Inés, Gustavo Beliz, Diego Coatz, y Paula Garnero. 2018. Industria 4.0: Fabricando el Futuro. Inter-American Development Bank. https://doi.org/10.18235/0001229.

BC Housing. 2021. «Design for Disassembly for Residential Construction».

Betz, Johann. 2019. «NZ Wood design guides. Designing for prefabrication». https://www.wpma.org.nz/timber-design-guides.html. «BIM Dictionary». 2021. BIM Dictionary. 2021. https://bimdictionary.com/en/building-information-modelling/2.

BIM Forum. 2020. «Level of Development Specification».

2022. «Level of Development (LOD) Specification 2021 Supplement».

Building and Construction Authority, y Bryden Wood Singapore. 2016. «BIM for DfMA (Design for Manufacturing and Assembly) Essential Guide».

Building and Construction Authority, Singapore. 2019. «The Code of Practice on Buildability».

Comisión nacional de productividad. 2020. «Productividad en el sector de la construcción».

CORFO. 2018. «Hoja de Ruta para Programa Estratégico de Manufactura Avanzada».

Corporación de Desarrollo Tecnológico, y Cámara Chilena de la Construcción. 2018. «Manual de Tolerancias para Edificaciones».

Déficit cero, y Centro UC Políticas Publicas. 2022. «Déficit Habitacional: ¿Cuántas familias necesitan una vivienda y en qué territorios? - Boletín 1: Estimación y caracterización del déficit habitacional en Chile». https://deficitcero.cl/uploads/ biblioteca/Minuta_EstimaciondelDeficit.pdf.

Eger, Tido, Claudia Eckert, y John Clarkson. 2005. «The role of design freeze in product development». Melbourne, Australia.

Fallahi, Azadeh, Erik A. Poirier, Sheryl Staub-French, Javier Glatt, y Nicholas Sills. 2016. «Designing for Pre-Fabrication and Assembly in the Construction of UBCäó»s Tall Wood Building». Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings, septiembre. https://doi.org/10.29173/mocs26.

Gao, Shang, Ruoyu Jin, y Weisheng Lu. 2020. «Design for Manufacture and Assembly in Construction: A Review». Building Research & Information 48 (5): 538-50. https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1660608.

Gibb, Alistair G. F. 1999. Off-Site Fabrication: Prefabrication, Pre-Assembly and Modularisation. New York: Wiley.

Goodrum, Paul M., Dong Zhai, y Mohammed F. Yasin. 2009. «Relationship between Changes in Material Technology and Construction Productivity». Journal of Construction Engineering and Management 135 (4): 278-87. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:4(278).

Guindos, Pablo. 2019. Fundamentos del diseño y la construcción con madera.

Guindos, Pablo, Francisca Evans Zaldívar, y Francisca González Rosas. 2019. Fundamentos del diseño y la construcción con madera. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica.

Guy, Brad, y Nicholas Ciarimboli. 2005. «Design for Disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building».

Hall, Daniel M., Jerker Lessing, y Jennifer Whyte. 2022. «New Business Models for Industrialized Construction». En Industry 4.0 for the Built Environment, editado por Marzia Bolpagni, Rui Gavina, y Diogo Ribeiro, 20:297-314. Structural Integrity. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82430-3_13.

Hemal, R.M.N., K.G.A.S. Waidyasekara, y E.M.A.C. Ekanayake. 2017. «Integrating design freeze in to large-scale construction projects in Sri Lanka». En 2017 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), 259-64. Moratuwa, Sri Lanka: IEEE. https://doi.org/10.1109/MERCon.2017.7980492.

Infraestructure and Projects Authority, y HM Treasury. 2018. «Proposal for a New Approach to Building: Call for Evidence».

Instituto Nacional de Normalización. 2023. «NCh3744: Construcción industrializada y prefabricada - Términos y definiciones».

«ISO 16739-1:2018 Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema». 2018.

Lessing, Jerker. 2006. «Industrialised house-buildings-concept and processes». Lund University.

Lessing, Jerker, Lars Stehn, y Anders Ekholm. 2005. «Industrialised housing: Definition and categorization of the concept». En . Sydney, Australia.

McKinsey & Company. 2020. «The next normal in construction How disruption is reshaping the world's largest ecosystem».

Ministerio de Economía, Fomento y Turismo y Subsecretaría de Economía y empresas de menor tamaño. 2023. «Decreto 11 Aprueba reglamento que establece requisitos de rotulación de la madera estructural para construcción». https://bcn.cl/3f8e0.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 2022. «Plan de Emergencia Habitacional 2022-2025».

MINVU, y CIM UC. 2023. «Catastro de capacidades y brechas de industrialización de prefabricadoras en madera de mediana y baja tecnología».

Monash University. 2017. «Handbook for the Design of Modular Structures».

Ostime, Nigel, Ian Heptonstall, y Steven Cross. 2021. «DfMA Overlay to the RIBA Plan of Work. Mainstreaming design for manufacture and assembly in construction».

Papageorgiou, Stavros, y Carolina Massai. 2020. «Los bosques de Chile: Pilar para un desarrollo inclusivo y sostenible». http://documents.worldbank.org/curated/en/466411591268480067/Chile-s-Forests-A-Pillar-for-Inclusive-and-Sustainable-Development.

Plan BIM. 2021. «Estándar BIM para proyectos públicos. Intercambio de Información entre Solicitante y Proveedores».

Redford, A. H., y Jan Chal. 1994. Design for assembly: principles and practice. London; New York: McGraw-Hill.

Smith, Ryan E. 2011. Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons.

Smith, Ryan E. 2017. Offsite Architecture: Constructing the future. London: Routledge.

Soh, S.L., S.K. Ong, y A.Y.C. Nee. 2014. «Design for Disassembly for Remanufacturing: Methodology and Technology». Procedia CIRP 15: 407-12. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.053.

State of Victoria. 2022. «Offsite Construction Guide. Delivering Victorian projects with modern methods of construction».

Staub-French, Sheryl, Francisco Calderón, Imen Chikhi, Erik Poirier, Divyarajsinh Chudasma, Shitian Huang, Puyan Zadeh, y Divyarajsinh Chudasma. 2018. «Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction». BIM TOPiCS Research Lab.

TECHO-Chile, y Fundación Vivienda. 2021. «Catastro nacional de campamentos 2020-2021».

The New Zealand BIM Handbook: A Guide to Enabling BIM on Building Projects. 2019. Third edition. Version 3.1. Wellington: BIM Acceleration Committee.

United Nations Environment Programme. 2022. «Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission»

Índice de Figuras

Página 11	**Figura 1:**	Intervención de figura a partir de «Catastro de capacidades y brechas de industrialización de prefabricadoras en madera de mediana y baja tecnología».
Página 17	**Figura 2:**	Torre experimental Peñuelas. Crédito: CIM UC
Página 19	**Figura 3:**	Elaboración propia a partir de Matrix Consulting "Impulsar la productividad de la industria de la construcción en Chile a estándares mundiales».
Página 21	**Figura 4:**	Intervención de figura a partir de «Catastro de capacidades y brechas de industrialización de prefabricadoras en madera de mediana y baja tecnología».
Página 22	**Figura 5:**	Elaboración propia
Página 23	**Figura 6:**	Elaboración propia a partir de Norma Chilena NCh 3744.
Página 24	**Figura 7:**	Elaboración propia
Página 25	**Figura 8:**	Elaboración propia
Página 26	**Figura 9:**	Elaboración propia
Página 27	**Figura 10:**	Crédito: Felipe Bascuñán S.
Página 30	**Figura 11:**	Elaboración propia a partir de «Collaboration, Integrated Information and the Project Lifecycle in Building Design and Construction and Operation».
Página 31	**Figura 12:**	Elaboración propia a partir de «Integrated Project Delivery: A Guide».
Página 33	**Figura 13:**	Elaboración propia a partir partir de «Prefab Architecture: A guide to modular design and construction».
Página 37	**Figura 14:**	Elaboración propia a partir de «Estándar BIM para proyectos públicos».
Página 38	**Figura 15:**	Elaboración propia a partir de «Estándar BIM para proyectos públicos».

Página 40	**Figura 16:** Planta de fabricación Tecno Panel, Crédito: CIM UC.
Página 41	**Figura 17:** Elaboración propia a partir de «Handbook for the design of modular structures».
Página 44	**Figura 18:** Crédito: CIM UC
Página 46	**Figura 19:** Elaboración propia
Página 49	**Figura 20:** Elaboración propia a partir de «The role of design freeze in product development».
Página 52	**Figura 21:** Crédito: CIM UC
Página 52	**Figura 22:** Crédito: CIM UC
Página 56	**Figura 23:** Crédito: CIM UC
Página 56	**Figura 24:** Crédito: CIM UC
Página 61	**Figura 25:** Crédito: CIM UC
Página 64	**Figura 26:** Elaboración propia a partir de «The next normal in construction. How disruption is reshaping the world's largest ecosystem».
Página 65	**Figura 27:** Elaboración propia a partir de «The next normal in construction. How disruption is reshaping the world's largest ecosystem».
Página 71	**Figura 28:** Elaboración propia a partir de «Manual de Diseño. Construcción, montaje y aplicación de envolventes para la vivienda de madera».
Página 71	**Figura 29:** Elaboración propia
Página 72	**Figura 30:** Elaboración propia
Página 73	**Figura 31:** Elaboración propia
Página 73	**Figura 32:** Elaboración propia
Página 74	**Figura 33:** Elaboración propia a partir de «How Buildings Learn: What Happens After They're Built».
Página 74	**Figura 34:** Elaboración propia
Página 76	**Figura 35:** Elaboración propia

Página 76	**Figura 36:** Elaboración propia
Página 77	**Figura 37:** Intervención de imagen a partir de Catálogo de cintas, sellantes y láminas. Rothoblaas. 2021.
Página 80	**Figura 38:** Elaboración propia
Página 82	**Figura 39:** Elaboración propia
Página 84	**Figura 40:** Elaboración propia
Página 85	**Figura 41:** Elaboración propia a partir de «V1, Solución sistema de ventilación continua tipo mixta extracción mecánica e inyección pasiva».
Página 85	**Figura 42:** Elaboración propia
Página 86	**Figura 43:** Intervención de imagen a partir de Catálogo Timber Frame. Rothoblaas.
Página 87	**Figura 44:** Elaboración propia
Página 87	**Figura 45:** Elaboración propia
Página 88	**Figura 46:** Crédito: CIM UC
Página 88	**Figura 47:** Crédito: CIM UC
Página 90	**Figura 48:** Crédito: KK Law
Página 91	**Figura 49:** Crédito: CIM UC
Página 94	**Figura 50:** Elaboración propia
Página 94	**Figura 51:** Elaboración propia
Página 95	**Figura 52:** Crédito: CIM UC
Página 97	**Figura 53:** Elaboración propia
Página 97	**Figura 54:** Elaboración propia
Página 98	**Figura 55:** Crédito: CIM UC
Página 99	**Figura 56:** Elaboración propia

Página 102	**Figura 57:** Crédito: CIM UC
Página 102	**Figura 58:** Crédito: CIM UC
Página 102	**Figura 59:** Crédito: CIM UC
Página 103	**Figura 60:** Elaboración propia a partir de «Circular economy in the built environment»
Página 107	**Figura 61:** Elaboración propia
Página 108	**Figura 62:** Elaboración propia
Página 109	**Figura 63:** Elaboración propia
Página 114	**Figura 64:** Crédito: Mikko Auerniitty
Página 115	**Figura 65:** Crédito: DJR Architecture
Página 115	**Figura 66:** Crédito: DJR Architecture
Página 116	**Figura 67:** Crédito: Jackson Main Architectur**e**
Página 116	**Figura 68:** Crédito: Anthony Bolante
Página 117	**Figura 69:** Crédito: Huber & Sohn GmbH & Co. KG
Página 117	**Figura 70:** Crédito: Huber & Sohn GmbH & Co. KG
Página 118	**Figura 71:** Crédito: Mikko Auerniitty
Página 118	**Figura 72:** Crédito: OOPEAA
Página 119	**Figura 73:** Crédito: Melvin Lau
Página 119	**Figura 74:** Crédito: BC Passive House
Página 120	**Figura 75:** Crédito: Ossabois
Página 120	**Figura 76:** Crédito: Ossabois
Página 121	**Figura 77:** Crédito: Sebastián Parada
Página 122	**Figura 78:** Crédito: Sebastián Parada
Página 122	**Figura 79:** Crédito: Sebastián Parada

Página 123	**Figura 80:** Crédito: E2E
Página 123	**Figura 81:** Crédito: E2E
Página 130	**Figura 82:** Elaboración propia
Página 132	**Figura 83:** Elaboración propia
Página 135	**Figura 84:** Elaboración propia

Centro UC
de Innovación
en Madera

Ministerio de Vivienda y Urbanismo
Gobierno de Chile