



Evaluación técnico económica de la utilización de fundaciones prefabricadas en edificaciones de estructura metálica

Technical and economic evaluation of the use of prefabricated foundations in steel structure buildings

Fecha de entrega: 3 de julio 2023

Fecha de aceptación: 10 de octubre 2023

Guillermo Bustamante, Miguel Soliz y Claudio Correa

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Alonso de Ribera 2850, Casilla 297, Concepción, Chile, gbustamante@ucsc.cl, mnsoliz@ing.ucsc.cl, claudiocorrea@ucsc.cl

Las fundaciones prefabricadas se confeccionan fuera del sitio de construcción y se envían para su instalación en el lugar. Este tipo de fundación es una opción a considerar en los nuevos proyectos porque su fabricación y transporte pueden ser más rápidos y menos costosos que la construcción de una fundación tradicional en el lugar. En Chile, los elementos prefabricados de hormigón armado se utilizan generalmente en infraestructuras viales como puentes y carreteras. Si bien las fundaciones prefabricadas pueden ser una opción atractiva debido a su rapidez, es importante tener en cuenta que deben ser diseñadas, fabricadas e instaladas cuidadosamente para garantizar que sean sólidas y seguras. Por otro lado, es importante evaluar el impacto de este método constructivo en los plazos y costos de los proyectos para poder aportar a la modernización del proceso constructivo.

Palabras clave: construcción industrializada, fundaciones, prefabricados de hormigón armado

Prefabricated foundations are manufactured off-site and transported for on-site installation. This type of foundation is an option to consider in new projects because its fabrication and transportation can be faster and less expensive than the construction of a traditional foundation on site. In Chile, precast reinforced concrete elements are generally used in road infrastructures such as bridges and highways. While precast foundations can be an attractive option due to their speed, it is important to keep in mind that they must be carefully designed, manufactured and installed to ensure that they are solid and safe. On the other hand, it is important to evaluate the impact of this construction method on project schedules and costs in order to contribute to the modernization of the construction process.

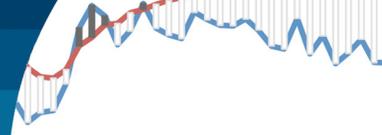
Keywords: industrialized construction, foundations, precast reinforced concrete

Introducción

La construcción en general en Chile ha sido por años ejecutada como un sistema constructivo artesanal en donde los materiales son acopiados en el lugar de la edificación u obra civil y luego son utilizados para la elaboración de las distintas partes del proyecto.

Por otro lado, ha surgido una corriente de modernización del proceso constructivo con distintos enfoques, los cuales van desde la intervención en etapas tempranas del proyecto, enfocándose en la implementación de tecnologías para modelar edificios, proyectar e incluso visualizar modelos 3D en terreno y visitas de realidad aumentada en donde es

posible ver el proyecto terminado antes de su ejecución. Además, se han incorporado elementos prefabricados en terminaciones tales como ventanas con kit de instalación y accesorios, puertas pre enmarcadas, paneles de techo con aislante incorporado, entre otros, los cuales poco a poco se van consolidando en las obras actuales. En cuanto a la obra gruesa los elementos mayormente prefabricados obedecen a estructuras metálicas las cuales se dimensionan, se incorporan sus conexiones y perforaciones para luego ser montadas en obra. También encontramos prefabricados de armaduras metálicas, cerchas, paneles de Metalcon, paneles SIP, escaleras, entre otros.



Trasladándonos al hormigón es común ver pequeños elementos prefabricados como adocretos, pastelones, módulos, tapas de cámaras, canaletas, tubos, apoyos, soleras, solerillas, cierros, elementos decorativos como bancas o macetas, todos estos elementos de poco volumen y no estructurales. En cuanto a elementos estructurales se utilizan prefabricados de grandes tamaños los cuales generalmente son vigas pretensadas y postensadas, en menor medida se encuentran los pilares y fundaciones (Kim *et al.*, 2010; Marcus y Thiers, 2015; Socarrás y Álvarez, 2021; Socarrás *et al.*, 2022; Tapia *et al.*, 2022).

Valenzuela (2018) evalúa sistemas de marcos y muros de hormigón armado prefabricados para edificios de mediana altura, enfocando su investigación a un edificio de viviendas sociales. Se concluye que implementando la prefabricación de los elementos la construcción del proyecto tarda un 40% menos, pero el costo de las partidas aumenta alrededor de un 20%, sin embargo, no se analiza el caso de prefabricar las fundaciones. Santibáñez (2016) sí estudia características técnicas de diseño de fundaciones prefabricadas, presentando puntos a considerar en el diseño, confección y traslado de las fundaciones, por el lado del diseño geotécnico y estructural.

Con lo expuesto surge la idea de evaluar el impacto del uso de las fundaciones prefabricadas a las edificaciones proyectadas en estructura metálica con lo que se obtiene un proceso constructivo con toda su estructura principal confeccionada fuera de obra, lo que permitiría tener condiciones de fabricación controladas, con posibilidad de obtener un producto de mejor calidad, en menor tiempo y con un sistema constructivo optimizado.

El objetivo general de este trabajo es realizar una evaluación técnica y económica de la utilización de fundaciones prefabricadas en edificaciones de estructura metálica a través de la comparación de plazos y costos con el sistema constructivo tradicional. Para ello, se considera estudiar los tipos de fundaciones que se especifican para los proyectos de estructura metálica y el proceso de confección de fundaciones in situ, en lo referente a partidas de emplentillado, enfierradura, moldaje, colocación de pernos de anclaje o placas insertas y determinar cuáles son los factores que condicionan su duración. Se consideran las limitaciones técnicas de las fundaciones prefabricadas en cuanto a dimensiones para transporte y capacidad de grúas

para montaje. Además, se analiza y compara los costos y tiempos de fabricación, transporte y montaje del sistema de fundaciones prefabricadas versus el costo del sistema tradicional de confección de fundaciones in situ.

Metodología

A continuación, se detalla la metodología utilizada para evaluar dos proyectos de infraestructura proyectada en estructura metálica, en donde se presenta la forma de evaluación y finalmente los proyectos a evaluar.

Forma de evaluación

En esta etapa se evalúan los costos, plazos y calidad del método de construcción de fundaciones tradicional versus la implementación de las fundaciones prefabricadas. La evaluación es aplicada en ambos proyectos utilizando los datos reales de proyectos proporcionados por profesionales de obra, realizando supuestos basados en las investigaciones previas, usando rendimientos observados en obra, así como los que se encuentran en sitios especializados. En cuanto a la evaluación de calidad se revisa lo propuesto de acuerdo a las normas vigentes en Chile que son aplicables al tema en estudio.

Proyectos a evaluar

Se presentan los proyectos a evaluar en cuanto a la implementación de fundaciones prefabricadas como alternativa al método constructivo tradicional. Estas obras fueron escogidas debido a que están proyectadas en estructura metálica. La fabricación de esta estructura se encuentra bastante aceptada como una etapa de fabricación en maestranza, y por lo tanto, es factible de aumentar su eficiencia constructiva incorporando el sistema propuesto. Para esta investigación se seleccionaron dos proyectos en ejecución los cuales son obra Centro de tratamiento de diálisis renal Concepción y obra Galpón-bodega Ruta 150 Penco-Lirquén.

Centro de tratamiento de diálisis renal Concepción

El proyecto consiste en un edificio de dos niveles (Figura 1) en estructura de acero destinado a centro de hemodiálisis con capacidad de 48 puestos simultáneos. La superficie que se edificará es de 1208.52 m².

La estructura de dos niveles en acero, estará compuesta por

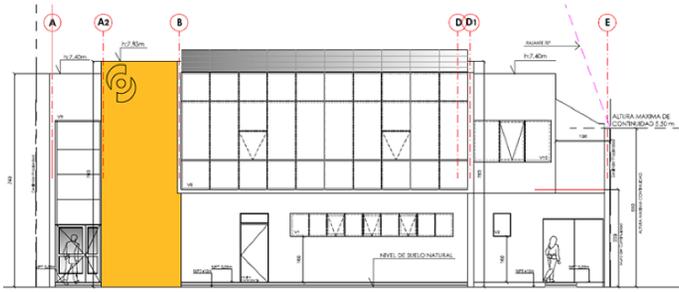
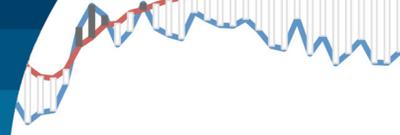


Figura 1: Elevación fachada edificio centro de tratamiento de diálisis renal Concepción

marcos estructurales con columnas y vigas tipo IN. El entrepiso se desarrolla con losa colaborante. Las fundaciones corresponden a zapatas aisladas bajo columnas (Figura 2). Se contempla un ascensor, dos montacargas y dos escaleras, cuya estructura soportante se compone de elementos de acero.

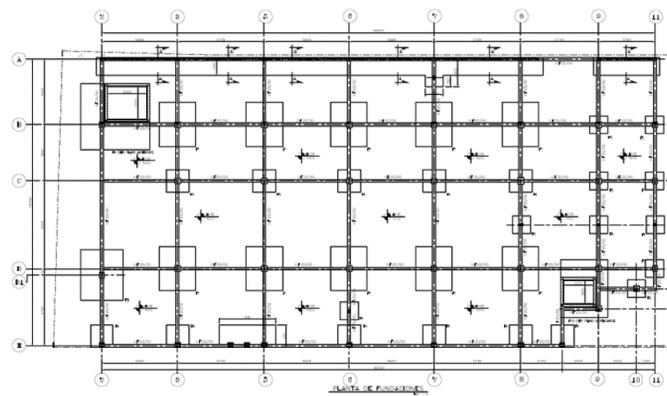


Figura 2: Planta de fundaciones edificio centro de tratamiento de diálisis renal Concepción

Galpón-bodega Ruta 150 Penco-Lirquén

Este proyecto comprende un galpón de estructura metálica (Figura 3) sobre fundaciones del tipo zapata aislada (Figura 4) destinado a bodega en un sector industrial ubicado en la ruta entre Penco y Lirquén.

Si bien este proyecto difiere en el tipo de uso en comparación al anterior, es interesante su estudio ya que se podría considerar como un “galpón tipo” el cual puede servir como antecedente para la implementación del sistema de fundaciones prefabricadas al ya actual y más masivo sistema de galpones prefabricados. Se obtiene así un sistema de galpones con la totalidad de su estructura principal fabrica-

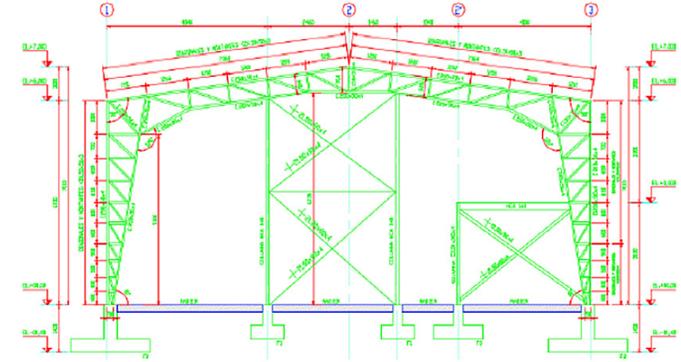


Figura 3: Elevación frontal Galpón-bodega Ruta 150 Penco-Lirquén

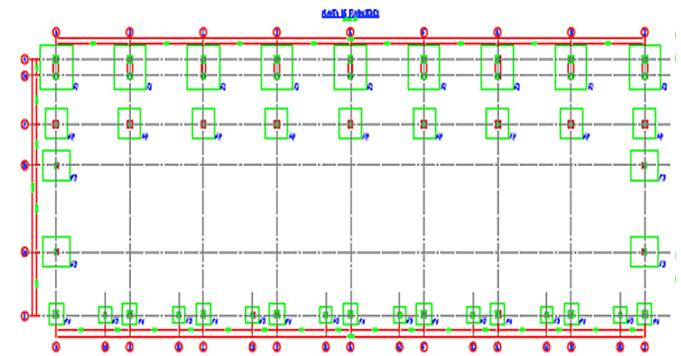


Figura 4: Planta de fundaciones Galpón-bodega Ruta 150 Penco-Lirquén

da fuera de la obra, generando una oportunidad de industrializar este sector, procesos, materiales y mano de obra. A diferencia del proyecto anterior en este no se cuenta con la programación de obra, por lo que será generada con ayuda de profesionales con experiencia en este tipo de obras.

Situación en Chile

Desde hace muchos años es latente que la construcción necesita aumentar su productividad ya que, en Chile, al igual que en resto del mundo esta industria es vital para el desarrollo y la economía. En Chile la construcción emplea hoy en día alrededor de 742.000 personas. La forma de construir aún tiene procesos muy antiguos fuertemente arraigados los cuales han ido quedando obsoletos ante el avance de la tecnología. Referente a esto existen varios enfoques que apuntan a actualizar el proceso constructivo, entre ellos encontramos el Programa Estratégico Nacional de Productividad y Construcción Sustentable PyCS que establece 4 planes de acción, los que refieren a capacitación y formación, centro tecnológico de I+D+i, Diseño in-

tegrado de proyectos BIM y por último industrialización y prefabricación.

Por otra parte, tenemos el Plan Construye 2025 es un programa que impulsa Corfo para transformar la construcción en cuanto a productividad y sustentabilidad. Dentro de sus ejes estratégicos se encuentra el capital humano, la transformación digital, innovación, sustentabilidad e industrialización.

Estas políticas han tenido como resultado la implementación de la DOM en línea, el Building Information Modeling BIM (ver una aplicación de BIM en Bustamante *et al.*, 2021), sistema de calificación energética del Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU, entre otros. Entre 2000 y 2018 el incremento de la productividad laboral de la economía chilena aumentó en un 20%, en cambio, la de la construcción prácticamente no experimentó variación. Lo que reafirma la necesidad de revisar y replantear los procesos como agentes de cambio dentro de la construcción chilena. Si se compara a nivel macro obras individuales con referentes internacionales estos logran una productividad promedio de un 53% mayor.

En Chile existe desde hace varios años una disminución importante de la disponibilidad de mano de obra debido a la migración de los trabajadores hacia el norte del país para desempeñarse en proyectos mineros. Esto es posible visualizarlo en la Figura 5, donde la disminución del rendimiento de hormigonado es expresada en m^3 colocados por hombre en un día (m^3/HD) de una empresa (CDT, 2013).

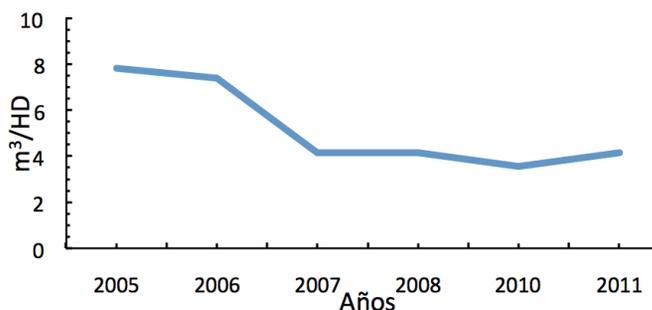


Figura 5: Rendimiento de la mano de obra en hormigonado (datos CDT, 2013)

En la Figura 6 se observa una disminución progresiva del rendimiento en partidas de moldaje. Según CDT (2013),

esta disminución se produce debido a la escasez de mano de obra, la cual no fue prevista por la empresa constructora en sus proyecciones para los años siguientes. También se observa una disminución mayor en el rendimiento en el año 2011 debido a modificaciones normativas luego del terremoto del 27 de febrero de 2010.

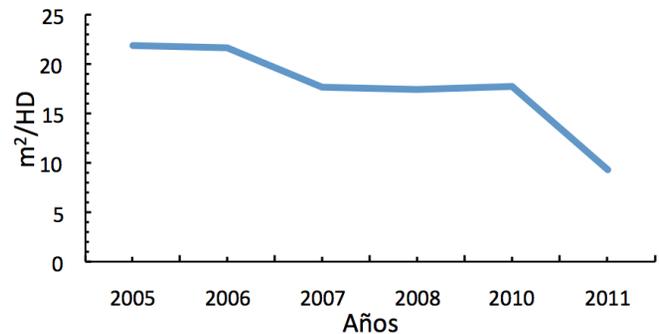


Figura 6: Rendimiento de la mano de obra en moldaje (datos CDT, 2013)

En la Figura 7 se observa un importante aumento en el rendimiento de la mano de obra en la partida de enfierradura en el año 2007 respecto de años anteriores producto de la incorporación de tecnología al sistema constructivo, pero luego la tendencia a la baja se hace notar esta vez por la escasez de mano de obra.

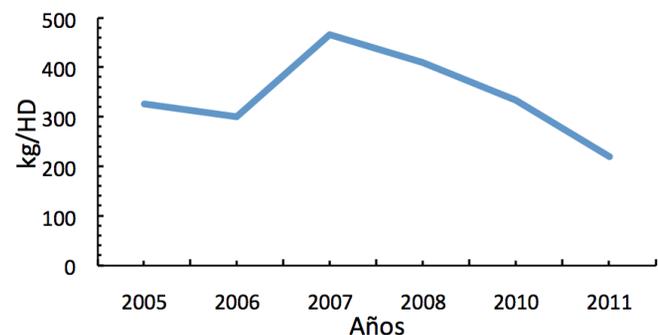


Figura 7: Rendimiento de la mano de obra en enfierradura (datos CDT, 2013)

En los últimos años la industria de la construcción ha sido nuevamente afectada, esta vez por la pandemia que se declara en Chile el 11 de marzo de 2020 en donde resultante de las medidas impuestas por la autoridad sanitaria y la paralización de obras por zonas de cuarentena, disminuyó la cantidad de empleados en construcción. En octubre de

2019 había 803.900 personas ocupadas en la industria bajando a 499.226 en medio de la pandemia. Cuando se reactivaron las obras hubo un letargo en la reincorporación de la mano de obra debido a diversos factores como el miedo a contagiarse, trabajadores que se volvieron independientes, las ayudas económicas otorgadas por el gobierno y retiros de dinero de las administradoras de fondos de pensión AFP. La escasez de mano de obra fue mayor en enfierradores, carpinteros de moldaje y ceramistas (DF, 2021).

En la Figura 8 se grafica la cantidad de personas ocupadas en la construcción entre los años 2020 a 2023, notando la disminución durante el periodo más restrictivo de la pandemia a mediados del 2020. También se ve una lenta recuperación durante todo 2021 y nuevamente fluctuaciones y tendencia al descenso en todo 2022, no logrando recuperar el crecimiento que traía el sector en 2019. Analizando los índices que se relacionan con el hormigón armado en la Figura 8 vemos los despachos de hormigón mensuales en los últimos 3 años. Se observa que luego de la reactivación de la industria a fines del 2020 la gráfica toma una tendencia negativa disminuyendo progresivamente. Comparando los dos índices anteriores mostrados en la Figura 8, encontramos que la curva de hormigón despachado mensualmente se aleja de la curva de trabajadores ocupados en construcción. Esto se puede traducir en que por cada trabajador en la industria se está colocando menos hormigón en obra, es decir, existe una disminución en la productividad de la colocación de hormigón.

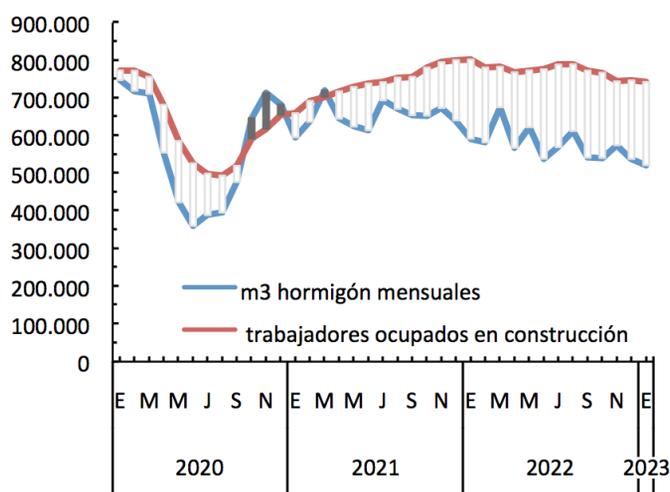


Figura 8: Despachos mensuales en m³ de hormigón y ocupados en construcción (datos de la Cámara Chilena de la Construcción cchc.cl)

Para comprender mejor la variación se revisan como ejemplo los meses de enero de los últimos cuatro años (Figura 9) ya que así se incluye enero 2020 representativo del escenario prepandemia en Chile y enero 2023 con los últimos datos disponibles. Basados en estos datos se compara la cantidad de hormigón despachado en m³ por mes versus la cantidad de trabajadores ocupados en construcción por mes (m³/H). Este indicador pasa de 0.97 m³/H en enero 2020 a 0.7 m³/H en enero 2023, teniendo una disminución en el rendimiento del hormigonado de un 27% en esta comparativa. En este análisis pueden existir múltiples factores que expliquen la disminución en la colocación de hormigón, por ejemplo, cambios de materialidad, menor disponibilidad de materia prima, cambios en las especificaciones técnicas por la entrada en vigencia del sistema de calificación energética de viviendas, entre otros. Pero lo cierto es que la colocación de hormigón ha disminuido.

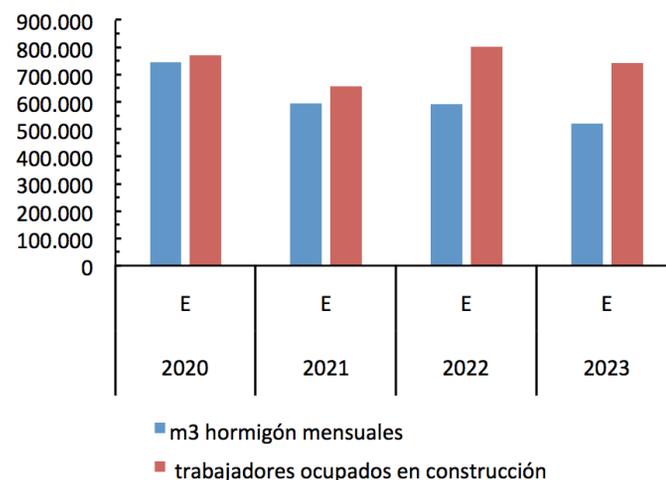


Figura 9: Despachos mensuales de hormigón y ocupados en construcción meses de enero 2020 a 2023 (datos cchc.cl)

Dentro de la problemática que compete a la productividad es posible realizar mejoras capacitando y certificando mano de obra e implementando Sistemas Prefabricados conocidos pero usados en baja proporción o directamente no aplicados en la industria nacional. Esto se evidencia como una posibilidad cuando miramos la situación de la productividad laboral en la construcción (Figura 10) de otros países en los cuales su nivel de productividad es hasta más de 2 veces mayor que la de Chile.

Productividad laboral en la construcción, valor agregado por trabajador¹

*Miles de USD por trabajador, 2017. Precios constantes, ajustado por PPP²

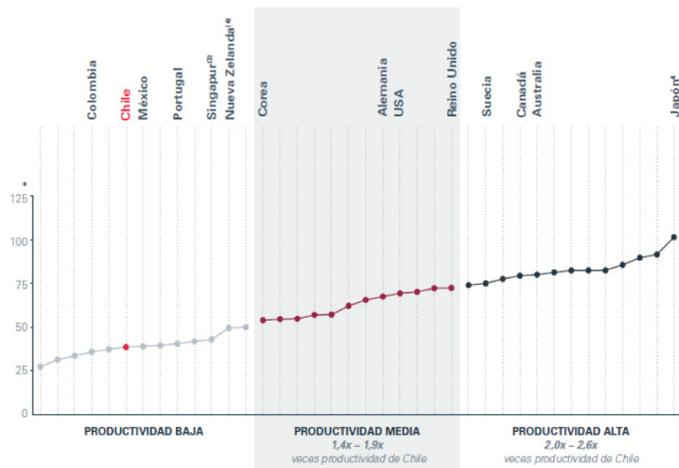


Figura 10: Productividad laboral en la construcción (OECD, gobierno de Singapur, Análisis Matrix Consulting, cdt.cl)

Para seguir en la misma línea centraremos la investigación en la construcción industrializada y los sistemas prefabricados, los cuales apuntan a mejoras en cuanto a productividad, sostenibilidad y tecnología. Además de abordar el impacto del aumento de la velocidad de la obra gruesa en un proyecto de edificación.

Construcción industrializada

La construcción industrializada se basa en la fabricación de componentes de construcción en una fábrica y su posterior ensamblaje en la obra.

La construcción industrializada incluye diferentes técnicas y sistemas de construcción, como el prefabricado, el módulo y el panel. El prefabricado implica la fabricación de componentes de construcción fuera de la obra y su posterior instalación en el lugar. El módulo consiste en la fabricación de edificios completos en una fábrica y su posterior transporte al sitio de construcción. El panel se refiere a la fabricación de paneles de pared, techos y suelos en una fábrica y su posterior ensamblaje en el sitio de construcción.

La construcción industrializada tiene varias ventajas, como la reducción del tiempo y el costo de la construcción, la mejora de la calidad y la precisión de los componentes, la reducción de la contaminación y el ruido en el sitio de construcción y la mejora de la seguridad y la salud de los trabajadores. Sin embargo, también puede presentar algunos desafíos, como la necesidad de una logística adecuada

para el transporte de componentes y la dificultad de adaptar los proyectos a las necesidades específicas de cada sitio.

Sistemas prefabricados a nivel global

Los sistemas prefabricados a nivel mundial son más utilizados en países desarrollados y tienen su origen en la posguerra. Debido a la escasez de vivienda los planificadores urbanos lo tomaron como una opción rápida para reponer la infraestructura perdida. Al fabricar los componentes fuera del sitio, se pueden utilizar fábricas y maquinaria especializada que pueden producir grandes cantidades de componentes de forma rápida y precisa. Además, el transporte de los componentes prefabricados al sitio de construcción es más rápido y eficiente que la fabricación de los componentes en el sitio.

Al fabricar los componentes en una fábrica, se pueden controlar más fácilmente las condiciones de producción y se pueden utilizar procesos de producción más sofisticados que en la construcción tradicional. Esto puede resultar en componentes más resistentes, duraderos y precisos.

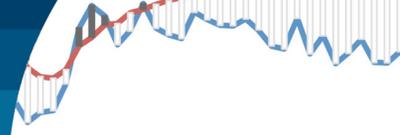
Los sistemas constructivos prefabricados también pueden contribuir a la sostenibilidad y la eficiencia energética. Al fabricar los componentes en una fábrica, se pueden utilizar materiales y procesos más sostenibles y se pueden utilizar tecnologías de generación de energía renovable. Además, al reducir el tiempo y el costo de la construcción, se pueden ahorrar recursos y energía.

Por otro lado, una de las principales limitaciones es la falta de flexibilidad en el diseño, ya que los elementos prefabricados pueden tener formas y tamaños estándar que pueden limitar la creatividad arquitectónica. El transporte, la logística e instalación de los elementos prefabricados a la obra también puede generar costos adicionales.

En resumen, los sistemas constructivos prefabricados son una opción cada vez más popular en todo el mundo debido a sus numerosas ventajas.

Sistemas prefabricados en Chile

En Chile los primeros sistemas constructivos prefabricados tienen origen luego del terremoto de la Ligua 1971 en donde el país recibe una donación de elementos prefabricados para la construcción de edificios donada por la Unión Soviética (Socarrás y Álvarez, 2021; Socarrás *et al.*, 2022).



También encontramos diversas empresas dedicadas a la confección de elementos prefabricados de hormigón, pero basando su oferta en prefabricados no estructurales. En elementos estructurales tenemos empresas las cuales se concentran en Santiago ofreciendo mayormente elementos estructurales viales, para puentes y pasos sobre nivel.

En la Región del Bío Bío, específicamente en la comuna de San Pedro de la Paz se encuentra Patagual Home, una moderna fábrica de viviendas industrializadas de madera con una capacidad productiva de 2000 unidades por año. Su concepción se justifica en el déficit habitacional existente en Chile con tecnología alemana y producción robotizada.

De esta manera se observa que la oferta está acotada, lo que en primera instancia se puede interpretar como un obstáculo para la implementación del sistema de fundaciones prefabricadas por parte de las constructoras, pero a su vez surge la oportunidad de un mercado con posibilidad de crecimiento y que hoy en día no cuenta con proveedores en la región del Bío Bío.

Fundaciones prefabricadas en Chile Mercado de fundaciones prefabricadas en Chile

En Chile existen distintas empresas dedicadas a la elaboración de elementos prefabricados de hormigón (Tabla 1). Sin embargo, cuando hablamos de fundaciones las opciones se reducen bastante. Dentro de las que ofrecen este servicio encontramos a Facoro SpA, Tensocret, Prefast y Hormisur las cuales dentro de su catálogo de productos ofrecen la fabricación de fundaciones. Además, cuentan con proyectos ya ejecutados que demuestran la factibilidad del sistema.

Tabla 1: Fabricantes de fundaciones prefabricadas en Chile

Empresa	Productos ofrecidos	Ubicación
Facoro	Cámaras eléctricas, elementos viales, elementos para cementerios, fundaciones	Iquique, Vallenar, Santiago, Puerto Varas
Tensocret	Pilares, vigas, losas, fundaciones, escaleras.	Santiago
Prefast	Cámaras, canaletas, escalas, durmientes, losetas, tapas, pilares, fundaciones.	Santiago
Hormisur	Infraestructura vial, postes, galpones, escaleras, fundaciones	Santiago, Parral, Temuco, Osorno

Marco legal y normativa

En Chile se cuenta con una normativa bastante exigente dada la intensa actividad sísmica a la que se exponen nuestras edificaciones. Estas normas definen y regulan el diseño de las estructuras y por lo tanto también regulan a los elementos estructurales prefabricados. La NCh 2369 (2003) la cual en el apartado 9.2 de Estructuras Prefabricadas de Hormigón, indica las condiciones del diseño sísmico, requisitos generales, uniones y también hace referencia como guía para el diseño estructural a ACI 318 (1999). La norma indica que el diseño debe cumplir con los siguientes criterios: sistemas gravitacionales, sistemas prefabricados con conexiones húmedas, sistemas prefabricados con conexiones dúctiles y sistemas prefabricados con conexiones secas. En el punto 9.2.1.2 de la norma NCh 2369 (2003) se encuentra lo siguiente: “los sistemas prefabricados con conexiones húmedas y conexiones dúctiles se deben diseñar utilizando las solicitaciones sísmicas correspondientes a una estructura monolítica de hormigón armado.”

En el capítulo 16 del ACI 318 (1999), “Hormigón prefabricado”, se habla de la distribución de fuerzas entre elementos, del diseño de elementos, diseño de conexiones y apoyos, integridad estructural, piezas embebidas después de la colocación del hormigón, identificación y marcas, manejo y evaluación de la resistencia.

Con estos documentos se puede diseñar y controlar los elementos prefabricados de hormigón armado.

Proyectos ejecutados

En Chile el uso de prefabricados estructurales de hormigón no es nuevo, estos sistemas cobran mayor importancia luego de desastres naturales en donde es urgente rehabilitar la infraestructura crítica dañada por las catástrofes. Dado que el uso de fundaciones prefabricadas no es masivo, se presentan ejemplos de proyectos ejecutados en Chile que incorporan fundaciones prefabricadas (Ilustración 1) que incluyen en su fabricación elementos conectores como placas o pernos, además de elementos para su izaje e instalación. Estos proyectos son principalmente industriales, mineros o de energía, los cuales en general se rigen además de las normas chilenas por exigencias de calidad impuestas por empresas extranjeras las que tienen protocolos de calidad, control, eficiencia en muchos casos superiores a los utilizados en construcciones tradicionales. Lo que deja la

interrogante de por qué no se aprovecha este sistema fuera de proyectos industriales, como por ejemplo en obras de equipamiento o habitacionales.



Ilustración 1: Fundaciones prefabricadas Prefast (www.prefast.cl/proyectos/ing-agrosonda-spa)

Colocación de fundaciones prefabricadas con grúa en su posición definitiva convirtiendo el trabajo en obra de confección de fundación en un proceso de montaje (Ilustración 2).



Ilustración 2: Montaje fundaciones prefabricadas Prefast (www.prefast.cl/proyectos/ing-agrosonda-spa)

Por otro lado, es posible ver lo despejado y limpio que se encuentra el terreno en la fase de montaje de las zapatas prefabricadas lo que difiere en gran medida de un proceso de moldajes, enfierradura y hormigonado estándar (Ilustraciones 2 y 3). Esto a su vez permite un mejor control de la seguridad en obra y la disminución de accidentes por condiciones inseguras.

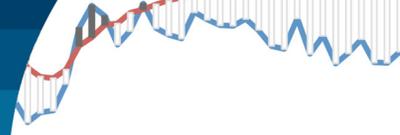


Ilustración 3: Fundaciones centro de distribución Buenaventura. (www.tensocret.cl)

Por último, es posible ver una potencial mejora de la eficiencia en la construcción implementando un sistema de fundaciones prefabricados. Esto se traduce en la subcontratación de partidas a empresas especializadas, en Chile en promedio se subcontrata un 36% versus el 69% subcontratado en países referentes en la materia. Por otro lado, la prefabricación en Chile es mayor que la de países referentes 34% vs 5% pero en cuanto a elementos estructurales de hormigón armado terminados, la prefabricación es de solo un 2% vs un 25% en países referentes.

Resultados

En general, en Chile se utiliza en mayor medida el proceso tradicional in situ para la confección de fundaciones, en donde los materiales son trasladados a obra y en ella se prepara e instala el moldaje, se prepara el fierro y se arma la enfierradura, luego se coloca y afianza en su posición definitiva, después se instalan y nivelan las placas o pernos y luego se procede al vaciado del hormigón según la calidad especificada. Otro porcentaje, alrededor del 34%, prefabrica las armaduras para luego solo ser instaladas en obra. Y solo un 2% utiliza fundaciones prefabricadas de hormigón armado. Adicional a esto para edificaciones de estructura metálica se indica que las fundaciones no pueden ser cargadas antes de 28 días limitando la instalación de la estructura durante cuatro semanas. Este tiempo de curado del hormigón es una de las limitantes principales para definir la duración, el fraccionamiento y el orden de las partidas. Si se retrasa el hormigonado inmediatamente se retrasa la colocación de la estructura.



En cuanto a tipo de fundación para edificaciones de estructura metálica lo predominante es encontrar especificaciones y diseños de fundaciones aisladas (zapata aislada) y fundaciones aisladas con vigas de fundación. Esto obedece a que la estructura metálica transmite las cargas principalmente de forma puntual a través de pilares por lo que no se justifica diseñar con zapatas corridas o losas de fundación.

Los factores condicionantes de la duración de las tareas necesarias para la confección de fundaciones in situ según el estudio es la disponibilidad de mano de obra la cual actualmente presenta un déficit respecto al año anterior de 7.43% sumado a la disminución de la eficiencia de la mano de obra en un 27% reflejada en la cantidad de despachos de hormigón versus trabajadores ocupados en construcción. Por otro lado, también se condiciona la duración de las tareas relacionadas a la confección de fundaciones in situ por la disponibilidad de terreno para fabricar en obra, falta de espacio para el acopio del material, problemas de tareas simultáneas como instalaciones sanitarias, instalaciones eléctricas, entre otras y, por último, estar expuestos a las inclemencias climáticas. Varios de estos problemas se solucionan con la prefabricación.

Las fundaciones prefabricadas, están limitadas en primer lugar por la infraestructura existente para su transporte y también por la capacidad de las grúas para su montaje. Esto se traduce en un problema logístico más que limitantes técnicas propias del diseño estructural del elemento. De esta manera las empresas del rubro ofrecen fabricar fundaciones con un peso máximo de 30 ton, un ancho máximo de 2.6 m (sobre 2.6 m se considera transporte sobredimensionado, requiere permisos y estudio de la ruta de traslado) y una altura máxima de la carga y camión de 4.2 m medidos desde el suelo. Para dimensiones mayores se ofrece diseñar el seccionamiento y su posterior fabricación por partes del elemento estructural.

En cuanto a la evaluación del sistema de fundaciones prefabricados a los proyectos mencionados se obtuvieron los siguientes resultados (ver Tabla 2).

Para el Caso 1, Centro de Tratamiento de Diálisis Renal de Concepción (Tabla 2), el costo de las fundaciones aumenta en un 15% respecto a la elaboración in situ, un 1.8% respecto al costo total de la obra gruesa y solo un 0.7% si la comparamos con el costo directo total CD del proyecto.

Respecto del tiempo de la partida, se obtiene primeramente una reducción del tiempo de ejecución en 16 días y si incorporamos el tiempo de curado del hormigón los beneficios del sistema prefabricado evidencian notoriamente con una disminución de la duración en 44 días. Esta disminución es muy relevante ya que habilita las fundaciones para recibir la estructura metálica.

Tabla 2: Resultados Centro de Tratamiento de Diálisis Renal de Concepción.

Indicador	Escenario		Resultado, %
	Original	Prefabricado	
Costo partida fundaciones, \$	67.517.348	77.644.950	15.0
Costo obra gruesa, \$	562.655.116	572.782.718	1.8
Costo directo CD, \$	1.393.949.696	1.404.077.298	0.7
Duración de partida, días	46	30	-16
Duración de partida y curado, días	74	30	-44

Considerando la reducción del tiempo de ejecución de la partida de fundaciones y bajo el supuesto de que la programación se puede optimizar a la nueva duración, se observó una potencial disminución de los gastos generales. Como resultado se obtuvo que los gastos generales originales GG son de \$215.594.043, al aplicar la reducción de los 44 días los GG se reducen a \$52.700.766, absorbiendo el aumento de \$10.127.602 del costo de las fundaciones prefabricadas y quedando una diferencia de \$42.573.164, lo cual se traduce en ahorro para el proyecto.

Para el Caso 2, Galpón-Bodega Ruta 150 Penco-Lirquén (Tabla 3), el costo de las fundaciones aumenta en un 12% respecto al proyecto original, un 1.6 % respecto al costo total de la obra gruesa y un 1.4% si la comparamos con el costo directo total del proyecto. En este caso el aumento de costo de fundaciones respecto al costo directo total es mayor puesto que en el galpón la incidencia de obra gruesa sobre el costo total del proyecto es muy alta.

En cuanto al tiempo de ejecución se obtiene una reducción de esta partida en 10 días sin considerar el curado del hormigón y 38 días si incorporamos el tiempo de curado del hormigón. Al igual que en el Caso 1 los beneficios del sistema prefabricado son aún más considerables en este tipo de estructuras donde la obra gruesa determina en gran medida el costo y duración del proyecto.

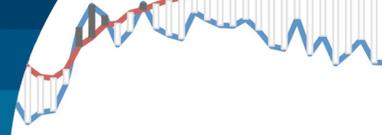


Tabla 3: Resultados Galpón-Bodega Ruta 150 Penco-Lirquén

Indicador	Escenario		Resultado, %
	Original	Prefabricado	
Costo partida fundaciones, \$	30.395.279	34.042.712	12.0
Costo obra gruesa, \$	224.502.000	228.149.433	1.6
Costo directo CD, \$	264.120.000	267.767.433	1.4
Duración de partida, días	30	20	-10
Duración de partida y curado, días	58	20	-38

Homólogo al Caso 1, se obtiene que los gastos generales originales de \$44.108.040, se reducen en \$18.623.395 al aplicar la reducción de los 38 días. De esta manera se compensa el aumento de \$3.647.433 del costo de las fundaciones prefabricadas quedando una diferencia de \$14.975.961 como ahorro en el proyecto.

Basado en los dos casos analizados se obtuvo de manera similar un aumento en el costo directo de la partida de fundaciones implementando el sistema prefabricado, esto se debe a la externalización de la partida a un contratista especializado el cual además de la confección de los elementos estructurales incluye el traslado a obra, las grúas (carga, descarga y montaje) y el personal especializado para el montaje en obra. Este costo toma mayor relevancia en estructuras donde no se especifica la cantidad de partidas de terminación y la obra gruesa es más incidente en los costos.

Por otro lado, en ambos casos se obtiene una disminución considerable en la duración de la partida de fundaciones y la ganancia de tiempo para comenzar a montar la estructura. Considerando la disminución total de la duración de la partida de fundaciones y bajo el supuesto de que la programación se puede optimizar a la nueva duración de esta partida, se observó en ambos proyectos que la disminución de gastos generales es capaz de compensar el aumento de costo y aun así generar disminución del costo total.

Finalmente, esto se traduce directamente en un ahorro de tiempo, ahorro en gastos generales, disminución de la duración total del proyecto y, por lo tanto, disminución del costo del proyecto lo que hace bastante atractiva la implementación del sistema de fundaciones prefabricadas para futuros proyectos.

Conclusiones

De acuerdo a los casos de análisis, supuestos, oferta de proveedores, condiciones de mercado y situación de la construcción en Chile se obtuvieron las siguientes conclusiones:

A nivel país se han implementado tecnologías de sistemas prefabricados que demuestran los beneficios de su uso en construcciones donde se logra aumentar la productividad. En la revisión de países referentes se encontró que aumentar el uso de prefabricados puede llevar a aumentar la productividad de la industria hasta más de dos veces la actual.

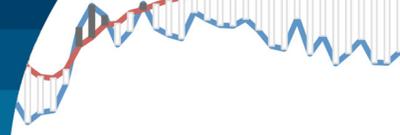
Respecto de las fundaciones se evidencia que para proyectos diseñados en estructura metálica solo se especifican fundaciones aisladas o aisladas con viga de fundación lo que define un mercado potencial para la implementación de fundaciones prefabricadas las cuales podrían adoptarse como especificación técnica desde el diseño de los proyectos dadas sus ventajas comparativas.

De las evaluaciones realizadas se concluye que la principal desventaja de la implementación de fundaciones prefabricadas, sin optimizar la programación, es que produce un aumento del costo directo de los proyectos de entre un 0.7% a un 1.4% siendo mayor en obras con menor nivel de terminaciones.

Opuestamente a lo anterior, en cuanto al tiempo el sistema reduce los plazos de ejecución de la partida de fundaciones (entre 10 y 16 días) y reduce el tiempo de espera de las fundaciones para recibir la estructura entre 38 y 44 días permitiendo generar programaciones de obra que no dependan del curado del hormigón de fundaciones.

Al traspasar la disminución de días de la partida de fundaciones a la duración total de cada proyecto se obtiene una disminución de los gastos generales. Esta disminución es capaz de absorber el aumento en el costo de fundaciones y generar un ahorro superior al costo de la implementación del sistema.

Finalmente, para los proyectos evaluados y bajo los supuestos indicados, se concluye que es favorable implementar el sistema de fundaciones prefabricadas ya que tiene como beneficio una disminución del costo total y del tiempo de ejecución de los proyectos.



Esta investigación responde a las ventajas y desventajas de implementar el sistema de fundaciones prefabricadas en edificaciones de estructura metálica, justifica la necesidad país de incorporar mayor tecnología a la industria de la construcción demostrando que existen brechas respecto de países referentes mostrados en el estudio.

Comentarios y recomendaciones

Durante el estudio se pudo notar que en la industria de la construcción en Chile existe una reticencia al cambio y a incorporar nuevos procesos constructivos, a pesar de que los sistemas que se han implementado demuestran beneficios. Por otro lado, se entiende la negación a cambiar los procesos en que somos un país sísmico en donde se debe seguir construyendo como hasta ahora debido al buen comportamiento estructural de las edificaciones existentes, sin embargo, como referente de productividad tenemos en primer lugar a Japón el cual es un país igual o más sísmico que Chile y su eficiencia en construcción es de las más altas del mundo. Otro argumento utilizado para justificar el no uso de nuevas tecnologías de forma masiva es que la industria de la construcción en Chile no es lo suficientemente grande para rentabilizar el cambio, pero en el estudio se encuentra Nueva Zelanda (país también sísmico) con una industria la mitad que la chilena y una población de apenas el 25% de la de Chile y con una eficiencia superior gracias a la incorporación de sistemas prefabricados y otras tecnologías.

De acuerdo a lo estudiado se hace evidente la falta de investigaciones respecto de la incidencia de la incorporación de sistemas prefabricados estructurales de hormigón armado en la productividad de proyectos. Por lo que se recomienda utilizar este documento para investigaciones futuras.

Por último, los ingenieros civiles como profesionales del sector, partícipes desde etapas tempranas de diseño de proyectos hasta del proceso constructivo, tenemos la opción de ser agentes de cambio dentro de la industria proponiendo nuevas especificaciones técnicas y diseños justificados con investigaciones como la presente para así comenzar a aprovechar de mejor manera los recursos disponibles sean estos materiales, humanos o el tiempo.

Referencias

- ACI318 (1999). Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318R-99). American Concrete Institute, Farmington Hills, USA
- Bustamante, G., Ochoa, J. y González, F. (2021). Propuesta de implementación de la metodología BIM 5D para obras de cimentaciones industriales en la Planta de Oxígeno de Arauco. *Obras y Proyectos* **30**, 74-90
- CDT (2013). Análisis de la productividad en obras de edificación en Chile. Cámara Chilena de la Construcción, Corporación de Desarrollo Tecnológico CDT, Chile
- DF (2021). Construcción registra falta de trabajadores y el déficit se mantendrá el segundo semestre. *Diario Financiero* (df.cl)
- NCh2369 (2003). Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales. INN, Santiago, Chile
- Kim, T.H., Park, S.J., Kim, Y.J. and Shin, H.M. (2010). Performance assessment of precast segmental PSC bridge columns with precast concrete footings. *Magazine of Concrete Research* **62**(11), 773-787
- Marcus, J. y Thiers, R. (2015). Control del daño sísmico estructural en pórticos prefabricados de hormigón armado a través de uniones híbridas autocentrantes. *Obras y Proyectos* **18**, 46-55
- Santibáñez, D. (2016). *Diseño de fundaciones de hormigón armado prefabricadas*. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad de Valparaíso, Chile
- Socarrás, Y.C. y Álvarez, E.R. (2021). Vulnerabilidad sísmica del sistema estructural prefabricado gran panel Soviético en edificios deteriorados y transformados. *Obras y Proyectos* **30**, 60-73
- Socarrás, Y.C., Álvarez, E.R., Candebat-Sánchez, D., Olivero, J.I. y Herrera, A. (2022). Validación del análisis estructural en el Gran Panel Soviético integrando procedimientos sísmicos lineales dinámicos y estáticos. *Obras y Proyectos* **32**, 78-89
- Tapia, N., Cuitiño, M. y Guzmán, A. (2022). Caso de fundación profunda con pilotes prefabricados de hormigón armado y monitoreo mediante Pile Driving Analyzer PDA. *Obras y Proyectos* **31**, 52-58
- Valenzuela, R. (2018). *Evaluación de sistemas constructivos para edificios de mediana altura con elementos de hormigón prefabricado*. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile